



**Marisa Pinho
Henriques**

**Modelação numérica/analítica da performance
balística de alvos metálicos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

UA-SD



286805



**Marisa Pinho
Henriques**

**Modelação numérica/analítica da performance
balística de alvos metálicos**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

“If everything seems under control, you're not going fast enough”

(Mario Andretti)

o júri

presidente

Professor Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
Professor Associado da Universidade de Aveiro

Professora Doutora Marta Cristina Cardoso Oliveira
Professora Auxiliar da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Professor Doutor Robertt Ângelo Fontes Valente
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

Professor Doutor António Gil d'Orey de Andrade Campos
Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Aveiro

Professor Doutor Filipe Miguel Horta e Vale Teixeira-Dias
Professor Auxiliar da Universidade de Aveiro

agradecimentos

Rute e Alexandra, obrigada por TUDO e desculpem alguma coisa. Contem SEMPRE comigo assim como eu conto sempre com vocês.

Ao meu orientador, Professor Doutor Filipe Teixeira-Dias, pelo estímulo, orientação, amizade e por estar sempre disponível para me ensinar, ouvir e corrigir os meus erros; a ele muito obrigada.

Aos membros do grids, em especial ao João e Vítor, pela ajuda, amizade e por ser um grupo de trabalho, dedicação, alegria e entusiasmo.

Aos meus colegas de mestrado, pela relação de amizade criada, em especial aos “vizinhos” pelo seu companheirismo e equipa que se formou e também pelos momentos de humor partilhados.

Ao Sr. Santos, Sousa e Irene pelo material e disponibilidade fornecidos e aos meus restantes amigos e colegas que de forma directa ou indirecta facilitaram este trabalho.

And last, but not least, à minha família que me apoiou e aturou, em especial aos meus pais, pois foi graças ao trabalho deles, confiança, coragem e apoio incondicional que me deram, que fez com que eu chegasse até aqui.

palavras-chave

Armadura, performance balística, profundidade de penetração, impacto, alvo, projétil, simulação numérica, modelação analítica, método dos elementos finitos.

resumo

A necessidade de desenvolver sistemas de protecção contra ataques de diversos tipos é, cada vez mais, uma questão de segurança pessoal, social e, obviamente, nacional. Estes sistemas e dispositivos podem ser específicos para protecção pessoal, de veículos ou de edifícios. O desenvolvimento tecnológico de sistemas de protecção inovadores permite acompanhar a evolução do tipo, tecnologia e performance das ameaças (armas, projéteis, explosivos, *etc.*). Consequentemente, é de grande importância que se possam desenvolver meios de avaliação previsiva da capacidade de absorção de impacto dos referidos sistemas de protecção. Estes sistemas devem ser capazes de resistir ao impacto de ameaças específicas.

Este trabalho enquadra-se na temática do desenvolvimento de sistemas de protecção contra impacto balístico e do estudo da capacidade de absorção de impacto. Pretende-se avaliar o desempenho balístico de sistemas metálicos de protecção pessoal (armaduras), de edifícios e veículos blindados civis e militares. O principal objectivo do trabalho é desenvolver e implementar modelos analíticos de previsão de penetração em alvos metálicos ultra-leves e proceder à sua validação numérica. As ligas metálicas utilizadas são ligas de aplicação especial balística de Alumínio (AA5083-H32) e Magnésio (AZ31B-H24).

Nos ensaios realizados analisam-se os danos causados em alvos de Alumínio (AA5083-H32) e Magnésio (AZ31B-H24) e a influência da espessura do alvo, recorrendo a um projétil ogival de uma munição de calibre 9mm, com uma energia de impacto de 0,616 kJ. Os ensaios foram realizados considerando três modelos distintos: alvo deformável e projétil rígido, alvo e projétil deformáveis e incorporando o modelo de dano de Johnson-Cook.

keywords

Armour, ballistic performance, depth of penetration, impact, target, projectile, numerical simulation, analytical modelling, finite element method.

abstract

The need to develop armour systems to protect against attacks from various sources is increasingly a matter of personal, social and national security. These systems and devices may be specific for personal protection, building or vehicle protection. In order to develop innovative armour and protection systems it is necessary to monitor developments being made on the type, technology and performance of the threats (weapons, projectiles, explosives, etc.) It is, therefore, of great importance the development of evaluation methods that can predict the energy absorption capabilities of such protection systems. These systems must be capable of resisting to the impact of specific threats. Consequently, the work here presented concerns the development of armours and protection systems against ballistic impact and the study of the impact energy absorption capability. The main goal of this work is to evaluate the ballistic performance of metallic systems for personal protection (armours), building protection and civilian and military armoured vehicles. Additionally, analytical and numerical models that predict the depth of penetration (DoP) in ultra-lightweight metallic targets are developed and implemented. The alloys used as targets are the following ballistic alloys: Aluminium (AA5083-H32) and Magnesium (AZ31B-H24).

Numerical tests are performed in order to analyse the damage (DoP, stress and strain profiles) caused on Aluminium (AA5083-H32) and Magnesium (AZ31B-H24) targets by an ogival projectile from a 9mm bullet, with an impact energy of 0,618 kJ. These tests are done considering three distinct models: deformable target and rigid projectile, deformable target and projectile and incorporating the Johnson-Cook damage model.

Conteúdo

I	Enquadramento e Objectivos	1
1	Enquadramento	3
1.1	Introdução	3
1.2	Objectivos	3
1.3	Introdução à Balística	4
1.3.1	Caracterização da balística	4
1.4	Classificação das Armas	5
1.4.1	A pistola semi-automática	7
1.5	Constituição e Composição das Munições	7
1.5.1	O Projétil	9
1.5.2	A Carga	11
1.5.3	O Invólucro	12
1.5.4	O Fulminante	12
1.6	Calibre 9 mm Luger	14
1.7	Estado da Arte	15
1.8	Guia de leitura	16
II	Modelação Analítica	19
2	Modelos analíticos de <i>performance</i> balística	21
2.1	Introdução	21
2.2	Dimensão das zonas de impacto	22
2.3	Energia elástica do impacto	23
2.3.1	Zona confinada — Região I	23
2.3.2	Zona não-confinada — Região II	24
2.4	Energia absorvida por deformação plástica	24
2.5	Energia cinética transferida ao alvo	25
2.6	Índice de <i>performance</i> balística	26
2.7	Validação e discussão	26
2.8	Matlab	27
2.9	Resultados analíticos	27
2.10	Alvo deformável e projétil rígido	28
2.11	Alvo e projétil deformáveis	29
2.12	Ensaio com Johnson-Cook	29

III	Modelação Numérica	33
3	Análises pelo Método dos Elementos Finitos	35
3.1	Introdução	35
3.2	O método dos elementos finitos	36
3.3	Programa de simulação numérica	37
3.4	Modelo de dano de Johnson-Cook	38
3.4.1	Dependência da velocidade de deformação	38
3.4.2	Modelo de dano dinâmico	39
4	Simulações Numéricas	41
4.1	Descrição dos ensaios realizados	41
4.2	Caracterização dos materiais	43
4.2.1	Modelo de comportamento do Alumínio	43
4.2.2	Modelo de comportamento do Magnésio	45
4.2.3	Modelo de comportamento do Cobre	45
5	Resultados e Discussão	47
5.1	Introdução	47
5.2	Alvo deformável e projectil rígido	47
5.3	Alvo e projectil deformáveis	54
5.4	Alvo e projectil deformáveis — Modelo de dano	63
IV	Discussão e Conclusões	73
6	Discussão e Conclusões Gerais	75
6.1	Introdução	75
6.2	Discussão	75
7	Comparação do Modelo Analítico e Numérico	79
7.1	Comparação entre os Modelos Analítico e Numérico	79

Parte I

Enquadramento e Objectivos

Capítulo 1

Enquadramento

Faz-se uma introdução ao trabalho, seus objectivos e estado da arte. Neste capítulo apresenta-se também um resumo sobre armas de fogo, constituintes das munições em geral e, mais especificamente, da munição calibre 9 mm Luger.

1.1 Introdução

A necessidade de desenvolver sistemas de protecção contra ataques de diversos tipos é, cada vez mais, uma questão de segurança pessoal, social e, obviamente, nacional. Cada país, de acordo com os níveis de ameaça a que pode estar sujeito e dos meios financeiros de que dispõe, faz uso de sistemas e dispositivos de protecção criteriosamente escolhidos e desenvolvidos. Estes sistemas e dispositivos podem ser específicos para protecção pessoal, de veículos ou de edifícios.

De forma ideal, o desenvolvimento tecnológico de sistemas de protecção inovadores deverá permitir acompanhar a evolução do tipo, tecnologia e *performance* das ameaças (armas, projecteis, explosivos, etc.) Consequentemente, para este fim é de grande importância que se possam desenvolver meios de avaliação previsiva da capacidade de absorção de impacto dos referidos sistemas de protecção. Estes sistemas devem ser capazes de resistir ao impacto de ameaças específicas.

No âmbito do que foi referido nos parágrafos anteriores, o trabalho que aqui se propõe, pretende enquadrar-se na temática do desenvolvimento de sistemas de protecção contra impacto balístico e no estudo da capacidade de absorção de impacto. Em termos específicos pretende avaliar-se a *performance* balística de sistemas metálicos para protecção pessoal, de edifícios e veículos blindados civis ou militares. Em termos globais, o objectivo deste trabalho é desenvolver e implementar um conjunto de modelos analíticos de previsão de penetração em alvos metálicos ultra-leves e levar a cabo a sua validação numérica.

Na secção seguinte serão descritos de forma mais detalhada todos os objectivos concretos do trabalho que aqui se apresenta.

1.2 Objectivos

Com este trabalho pretende-se estudar a *performance* balística de algumas ligas metálicas leves. É dada especial ênfase a ligas leves como algumas ligas de aplicação especial balística de Alumínio e Magnésio. Assim, de forma estruturada, os objectivos do trabalho que aqui se apresenta, são os seguintes:

1. Implementar um conjunto de modelos analíticos para determinação da profundidade de penetração¹ de projecteis rígidos em alvos com comportamento não-linear plástico. No âmbito deste objectivo genérico pretende-se ainda calcular a eficiência de protecção balística de diversos materiais, recorrendo aos modelos referidos.
2. Determinar a capacidade de protecção de alvos metálicos de geometria seleccionada — preferencialmente de ligas de Alumínio e de Magnésio.
3. Realizar um conjunto de simulações numéricas de impacto balístico com o objectivo de calibrar e validar os modelos analíticos para determinação da profundidade de penetração de projecteis rígidos em alvos metálicos.
4. Comparar os resultados analíticos e numéricos obtidos com resultados experimentais disponíveis na literatura da especialidade. Refinar a calibração dos modelos analíticos e numéricos com estas comparações.
5. Estudar o efeito de alguns parâmetros tecnológicos na *performance* balística dos materiais estudados. Estudar criteriosamente a relação entre o peso (massa do alvo metálico) e o volume de cada um dos materiais estudados.
6. Confrontar os resultados destas análises com a *performance* balística de cada material.

Nas secções seguintes, e uma vez definidos e detalhados os objectivos deste trabalho, faz-se uma breve descrição introdutória aos princípios gerais da balística.

1.3 Introdução à Balística

De uma forma genérica, a balística é a ciência que estuda os projecteis, o seu movimento, comportamento interno e externo. Geralmente, a balística dedica-se em especial aos projecteis de armas de fogo. De forma mais detalhada, com os princípios da balística é possível analisar a trajectória, impacto, marcas, explosão, *etc.*, dos projecteis. Tal é possível recorrendo a técnicas próprias, conhecimentos físico-químicos específicos e outras ciências como, por exemplo, a dinâmica de movimento, a mecânica dos fluidos, a termodinâmica, *etc.*

Simplificando a análise ao caso bidimensional, o movimento balístico geral pode ser estudado como uma decomposição em dois movimentos: uma componente de movimento vertical e outra de movimento horizontal. Se se desprezarem todas as acções de carácter dissipativo, por estar directamente associada ao efeito da aceleração gravítica, a componente vertical do movimento do projectil é rectilínea e uniformemente variada. Por outro lado, na direcção horizontal, o projectil tem um movimento uniforme, uma vez que não se verifica o efeito da aceleração da gravidade.

No entanto, esta é uma análise simplista e que considera apenas os efeitos genéricos da mecânica do movimento. Não é possível dissociar estas análises de todas as não-linearidades e variáveis inerentes aos processos balísticos. Consequentemente, na secção seguinte dedica-se algum espaço à caracterização detalhada da balística.

1.3.1 Caracterização da balística

Como ciência que estuda o movimento de corpos lançados ao ar livre, e estando geralmente associada ao disparo de projecteis por armas de fogo, é frequente decompor a balística em três componentes distintas. Estas podem ser designadas por: (i) a balística interna; (ii) balística externa e (iii) balística terminal.

¹Do inglês DoP: *depth of penetration*.

A balística interna (também designada por balística interior) estuda o movimento do projectil desde o momento do disparo até ao instante em que abandona a arma, baseando-se nas variações de temperatura, volume e pressão dos gases no interior da arma durante a explosão do material combustível. Na balística interna também são parâmetros importantes o formato (geometria) da arma e do projectil bem como os materiais em que são construídos.

A balística externa (também designada por balística exterior) dedica-se ao estudo do movimento do projectil, desde o instante em que o este abandona a arma até ao instante em que atinge o alvo. Este estudo envolve considerações aerodinâmicas para relacionar o movimento do projectil com o ar (ou outro fluido) que o envolve. Na balística externa são factores importantes o calibre, formato, massa, velocidade inicial e rotação do projectil. Estes são factores determinantes na idealização, projecto e construção de um projectil com grande poder de destruição.

De um ponto de vista meramente físico, e no que diz respeito à energia envolvida, pode deduzir-se que a massa e a velocidade são dois dos factores mais importantes no desenvolvimento de uma arma, de um projectil e, consequentemente, de qualquer sistema de protecção. De uma forma genérica, a energia cinética pode ser estimada como $E_c = mv^2/2$. Considerando que a componente de energia dissipada durante o movimento do projectil é negligenciável, a energia que será transmitida ao alvo é a energia cinética do projectil. Assim, a maximização desta energia permitirá incrementar o potencial da ameaça.

Finalmente, a balística terminal estuda os efeitos do projectil (ameaça) no impacto contra o alvo. A magnitude destes efeitos depende da trajectória do projectil (consequência directa da balística interna e externa), de eventuais influências externas e, obviamente, do tipo, material (madeira, metal, material compósito, tecido humano, etc.), forma e de estrutura do alvo. Assim, de uma forma resumida, a balística terminal pode ser definida como a ciência que estuda os fenómenos que ocorrem no momento em que o projectil atinge o alvo. Durante muitos anos esta foi uma ciência relativamente desconhecida e baseada em mitos e mal-entendidos. Só com o evento da utilização de simuladores de alta velocidade, de raios-X e de sistemas de registo fotográfico de alta velocidade é que a balística terminal começou a ser compreendida. Estes estudos têm vindo a tornar-se extremamente úteis, não só sob o ponto de vista do desenvolvimento de sistemas de protecção — tópico central deste trabalho — mas também do ponto de vista médico-legal e na avaliação e abordagem médico-cirúrgica.

1.4 Classificação das Armas

Para melhor entender os conceitos da balística terminal é necessário começar por compreender os vários tipos de ameaças e projecteis existentes, assim como o seu modo de operação. Esta secção é dedicada precisamente aos sistemas de disparo de projecteis — as armas.

Como não existe um conceito preciso de arma, neste trabalho dar-se-á maior importância a armas de fogo. Assim, pode designar-se por arma qualquer instrumento, objecto ou aparelho usado com o intuito de atacar e/ou defender de alguém ou de alguma coisa. Consequentemente, uma arma é todo e qualquer tipo de objecto criado ou utilizado com o objectivo de atacar e/ou de defender.

Tendo em conta a sua função, as armas podem classificar-se do seguinte modo:

- Armas ofensivas: são as armas com capacidade dedicada de ataque.
- Armas defensivas: são as armas com capacidade dedicada de defesa. As armas defensivas podem ser individuais (escudo, capacete, etc.) ou colectivas (carro blindado, etc.)
- Armas ofensivas/defensivas: são armas com capacidade e finalidade dupla de defesa e de ataque como, por exemplo, os carros de combate.

No trabalho que aqui se apresenta é dada especial importância à relação entre as armas ofensivas e defensivas. Estas podem ser classificadas quanto ao seu modo de utilização. De entre as armas ofensivas será dedicada atenção de relevo às armas de mão, armas de arremesso e armas de projecção.

As armas de mão são armas que apenas produzem efeito sobre o alvo quando manuseadas. Nestas, incluem-se as armas brancas², dividindo-se em: (i) contundentes ou de choque, que actuam por choque (e.g. bastão e moca); (ii) de corte ou gume, que actuam por cutilada ou corte (e.g. espada e faca); (iii) de estucada ou ponta (haste e punho), que actuam por ponta (e.g. lança e punhal) e de gume ou ponta. Estas últimas reúnem as características das duas anteriores e actuam por gume ou ponta (e.g. sabre e alabarda).

As armas de arremesso actuam directamente depois de arremessadas à distância pela mão do indivíduo. A granada de mão é um exemplo de arma de arremesso.

As armas de projecção lançam um projectil à distancia pelo impulso de uma determinada força. Estas armas podem ser classificadas do seguinte modo: (i) armas de tiro, que actuam por meios elásticos (nervos de animais, cordas, fibras, etc.) e por expansão rápida de pressão de ar. Exemplos destas armas são o arco, a besta e as armas de pressão de ar; (ii) armas de fogo, que lançam um projectil através da força da combustão de produtos químicos explosivos. Neste tipo de armas é necessário considerar os seguintes grupos: (i) as armas ordinárias ou de repetição, nas quais, para cada disparo há a acção do utilizador quer sobre o gatilho quer sobre o carregamento, introduzindo novo projectil para cada disparo, realizando estas operações manualmente. São exemplo de armas ordinárias ou de repetição a espingarda e carabina tradicionais e as caçadeiras de dois canos; (ii) as armas automáticas, de tiro automático e de tiro semi-automático. Estas são armas de fogo de utilização geral pela Polícia de Segurança Pública Portuguesa (PSP) em que todas as operações de funcionamento são realizadas automaticamente. O operador tem somente que introduzir a primeira munição. São exemplo de tais armas as pistolas e pistolas-metrelhadoras; e (iii) as armas especiais, que são armas de utilização específica, mais adequadas aos meios militares como, por exemplo, os morteiros, os canhões e os mísseis. Na figura 1.1 pode ver-se um esquema genérico de classificação das armas.

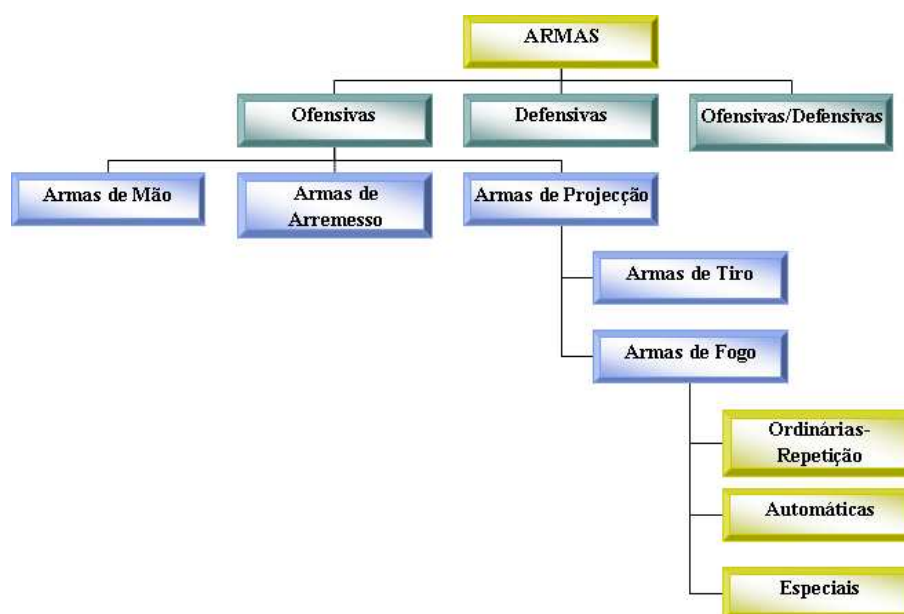


Figura 1.1: Esquema da classificação das armas.

²Assim designadas por serem frequentemente construídas em aço e por, pela acção da luz, provocarem reflexos.

Nos parágrafos seguintes apresenta-se uma descrição relativamente breve sobre a origem e tipo de arma que será *utilizada* no decurso deste trabalho.

1.4.1 A pistola semi-automática

As armas longas e colectivas deram origem às armas curtas e individuais, isto é, a armas que podiam ser facilmente transportadas e utilizadas por um só indivíduo. Até aos dias de hoje, as armas curtas têm vindo a evoluir de forma divergente das suas *progenitoras*, tendo inicialmente as mesmas características (e.g. cano, fechos e outros), sendo apenas consideradas uma “miniaturização” das armas longas. Cada uma foi evoluindo, em virtude de suas finalidades distintas.

Sendo assim, do primeiro *canhão-de-mão* até ao revólver e pistola semi-automática (dois tipos principais de armas curtas actuais), o Homem foi sempre procurando da arma ideal, que pudesse ser facilmente transportada e que tivesse a capacidade de múltiplos disparos (tiros) sem a necessidade de ser recarregada repetidamente.

Os revólveres têm sobrevivido até aos dias de hoje pelas suas excelentes qualidades, tornando-os armas robustas, aptas para uso frequente e de fiabilidade extrema. Os revólveres modernos derivam de um modelo da firma norte-americana Smith & Wesson, que desenvolveu o revólver de tambor reversível, de abertura lateral, à época da criação e popularização do calibre .38 SPL, de cartucho metálico, apropriado para a chamada retro-carga.

A criação dos cartuchos metálicos de fogo central bem como os avanços na produção de novos tipos de pólvora e munições, tornaram possível o desenvolvimento de uma arma de repetição que utiliza a força dos gases produzidos na detonação, aplicando o princípio da igualdade entre acção e reacção para realizar, de forma automática, as operações de extracção do estojo deflagrado, ejeção deste para o exterior da arma, alimentação da câmara da arma com novo cartucho e engatilhamento do mecanismo de disparo.

As primeiras armas semi-automáticas surgiram graças à criação do primeiro cartucho metálico. Em 1893 Andres Schwarzlose propôs uma pistola automática que utilizava o movimento do cano como mecanismo de repetição. Ainda que não tenha sido produzida, o sistema mecânico foi adaptado a metralhadoras utilizadas durante a Primeira Guerra Mundial. A primeira pistola semi-automática que alcançou fama mundial, embora não tivesse sido comercializada em grande escala, foi desenhada pelo norte-americano Hugo Borchardt que, na Alemanha, trabalhando por contrato para a empresa Ludwig Loewe, a comercializou a partir de 1893.

Na prática as pistolas semi-automáticas têm demonstrado ser armas de combate e defesa por excelência, tendo vindo a substituir de forma gradual o revólver. Segundo fabricantes como Glock e Sig-Sauer, Heckler & Koch, Walther, etc., actualmente, esta classe de arma tende a substituir de vez o revólver, quer na actividade policial quer na defesa pessoal. Para melhor entender os componentes e esquema de funcionamento de uma arma semi-automática pode ver-se, na figura 1.2, um corte de uma pistola *Walter P99*.

1.5 Constituição e Composição das Munições

A invenção da pólvora e, mais tarde, do cartucho metálico, tiveram um papel fulcral no aparecimento e desenvolvimento tecnológico das armas de fogo. Por sua vez, a unidade de munição das armas de fogo modernas é de grande importância uma vez que define a sua utilização táctica. Este facto prende-se com a possibilidade de realizar um maior número de disparos num espaço de tempo mais reduzido.

Sem o cartucho metálico não seria possível o desenvolvimento de novos sistemas de operação. Consequentemente, não existiriam armas semi-automáticas e automáticas. Assim, de uma forma genérica, designa-se por cartucho o conjunto de todos os elementos metálicos necessários ao



Figura 1.2: A pistola semi-automática *Walther P99* em corte.

disparo, desde o projectil (ou bala) até ao fulminante (escorva ou cápsula) passando pelo invólucro (estojo ou caixa) e pela carga da munição. O cartucho metálico foi elaborado de forma a ser introduzido directamente na culatra da arma para a qual é destinado, manual ou mecanicamente. Na figura 1.3 pode ver-se uma representação esquemática em corte dos constituintes de uma munição.



Figura 1.3: Representação esquemática dos constituintes de uma munição de 9 mm de ponta oca: 1 – projectil, 2 – carga 3 – invólucro e 4 – fulminante.

Nas secções seguintes descrevem-se em detalhe os constituintes, as características e particularidades do projectil, da carga, do invólucro e do fulminante.

1.5.1 O Projétil

De uma forma genérica, um projétil pode definir-se como um artefacto, que pode ser metálico ou não, expelido pela arma de fogo. Assim, o projétil torna-se o principal e mais crítico elemento da munição. A magnitude dos efeitos balísticos ou lesivos da munição dependem, naturalmente, do tipo, geometria e massa do projétil, bem como do tipo de pólvora.

A organização balística da arma³ e a organização do projétil, da carga empregue e efeitos provocados, são factores determinantes para definir o alcance, a tensão da trajectória e, consequentemente, a precisão do tiro. Na figura 1.4 podem ver-se alguns tipos de projéteis *comuns*.



Figura 1.4: Alguns tipos de projéteis de ponta ogival.

No seguimento do que foi referido nos parágrafos anteriores, torna-se claro que a eficácia de um tiro depende, também: (i) das qualidades estáticas do projétil⁴; (ii) da qualidade e quantidade da carga e (iii) dos efeitos dos projéteis sobre o alvo.

Um projétil é composto por várias partes metálicas. Estas partes devem ser densas, pouco deformáveis e infusíveis. Nas primeiras armas automáticas o metal utilizado era o chumbo puro. Um dos problemas que se verificava era a ocorrência de fenómenos de fusão superficial dos projéteis, provocada pelo atrito resultante do aumento da velocidade do disparo. No entanto, este problema foi contornado com a adopção do projétil de camisa metálica completa — projétil blindado — que se revelou ser um dos maiores progressos nesta área.

O projétil é constituído por uma parte interna — o núcleo — e uma parte externa que reveste o núcleo e é frequentemente designada por camisa. Na figura 1.5 pode ver-se um projétil em corte evidenciando a camisa e o núcleo.

O núcleo do projétil pode ser de aço, bronze ou chumbo. Porém, este último é o mais utilizado por questões de custo e peso. Frequentemente, é necessário endurecer este metal ligando-o a outros metais. Por outro lado, a camisa deve ser suficientemente resistente para evitar o rasgamento, suficientemente espessa para evitar a fusão do núcleo e com dureza relativamente baixa para não deteriorar (desgastar) as estrias da arma. Neste caso, o cobre e o aço são os materiais mais utilizados.

Inicialmente, nas primeiras armas de alcance e precisão limitadas, os projéteis tinham forma esférica. Mais recentemente, optou-se por construir os projéteis recorrendo a geometrias ogivais, mais comuns e de uso generalizado. No entanto, existem ainda outras formas como, por exemplo: (i) o canto-vivo, de uso exclusivo para tiro desportivo (tiro ao alvo) por ter carga reduzida e

³Define-se por organização balística de uma arma o calibre, o comprimento do cano, o número de estrias, bem como outros parâmetros construtivos que possam influenciar a *performance* da arma.

⁴Define-se por qualidade estática do projétil a sua composição, forma, comprimento, peso e calibre.



Figura 1.5: Exemplo de projectil semi-camisado de ponta oca.

perfurar papel de forma mais nítida; (ii) o semi-canto-vivo, de uso generalizado; (iii) o ogival de ponta plana, também de uso geral e muito utilizado no tiro prático por provocar menor número de “engasgos” com a arma; (iv) o cone truncado, de uso idêntico ao ogival de ponta lisa; (v) o semi-ogival, também muito utilizado em tiro prático, e (vi) o ponta oca ou expansivo, capaz de aumentar de diâmetro ao atingir um alvo dútil e flexível (e.g. humano, produzindo assim maior destruição de tecidos).

O projectil ideal deverá ter um peso intermédio para otimizar duas condições contraditórias: a velocidade inicial e a tensão da trajectória, tirando partido das duas em simultâneo. Caso contrário, se se optar por um projectil demasiado leve, este terá uma trajectória muito tensa para distâncias pequenas. Por outro lado, um projectil demasiado pesado terá uma trajectória demasiado tensa a grandes distâncias. Em igualdade das restantes condições, o projectil mais leve tem maior velocidade inicial, mas sofre um retardamento maior devido ao efeito de atrito (arrasto) com o ar.

O diâmetro de um projectil é usualmente designado por calibre. Este valor está, naturalmente, intimamente associado ao peso do projectil. O calibre dos projecteis deve ser 0.2 a 0.3 mm superior ao diâmetro do cano medido no fundo das estrias, para garantir a pressão inicial do disparo e, consequentemente, para que o projectil adquira movimento de rotação. Na figura 1.6 apresenta-se, de forma esquemática, o procedimento de medição do calibre de um projectil.



Figura 1.6: Representação esquemática do procedimento de medição do calibre de um projectil.

Como é do conhecimento geral, nem todos os países utilizam os mesmos sistemas de medida. Nos países da Europa Continental, assim como em todos os que usam o sistema métrico, o calibre é expresso indicando o diâmetro do projectil e o comprimento do invólucro, em milímetros, com os dois valores separados pelo sinal “×”. A título de exemplo, um projectil 9 × 19 mm tem 9 mm de calibre e 19 mm de comprimento do invólucro. No Reino Unido, Estados Unidos da América e em

todos os países da *Commonwealth*⁵, que usam o sistema sexagesimal, os calibres são designados pelo diâmetro do projectil em centímetros ou milésimos de polegada.

A quantidade de carga empregue na munição também é um factor muito importante para garantir a qualidade do disparo. Isto porque a carga tem de ter capacidade para, após a sua combustão, impelir de forma brusca o projectil para fora do cano da arma. A quantidade de carga está directamente relacionada com o calibre, ou seja, para munições de grande calibre, torna-se necessário aumentar a carga da pólvora ou, alternativamente, mesmo melhorar a sua qualidade. Caso não haja esse cuidado, e se a carga empregue na munição não tiver a potência necessária e adequada ao peso do projectil, o disparo perde eficácia e *performance*.

Após o disparo, é grande a probabilidade de um projectil atingir um obstáculo, intencionalmente ou não. No momento do impacto podem ocorrer fenómenos como, por exemplo, os seguintes:

- a) Penetrar ou perfurar. A penetração ou perfuração é o espaço percorrido pelo projectil, no interior do alvo. É contabilizado desde a superfície do alvo até ao local em que o projectil se imobiliza. O poder de penetração é função da qualidade do material que constitui o alvo e das características próprias do projectil.
- b) Derrubar. O poder derrubante é o grau (maior ou menor) de traumatismo causado pelo projectil no ser humano, quando penetra os seus órgãos. O poder derrubante varia com o calibre, aumentando proporcionalmente a este.
- c) Poder vulnerante: é determinado pela capacidade que o projectil tem de causar lesões no ser humano, quando penetra os seus órgãos. O poder vulnerante é tanto maior, quanto maiores forem as lesões causadas e varia conforme as características do próprio projectil, (constituição, forma e velocidade).
- d) Ricochete: diz-se que acontece o fenómeno de ricochete quando um projectil sofre um ou mais desvios na trajectória inicial, ao encontrar-se com uma superfície dura e resistente à penetração. As trajectórias de ricochete pode ser completamente irregulares.

1.5.2 A Carga

A porção de substância explosiva que se introduz no invólucro para iniciar o movimento e impelir o projectil designa-se por carga de munição. Esta substância explosiva pode ser sólida, líquida ou gasosa. Actualmente, nas armas de fogo convencionais só são utilizadas substâncias explosivas sólidas, uma vez que os outros tipos de substâncias ocupam grande volume e exigem um maior cuidado no seu manuseamento tornando o seu uso pouco prático.

Nas substâncias explosivas, como o próprio nome indica, ocorrem fenómenos explosivos. Estes fenómenos consistem no rápido e violento desenvolvimento de uma grande quantidade de gases ou de corpos no estado gasoso, a temperatura elevada e num espaço de tempo muito pequeno. Os fenómenos explosivos são geralmente acompanhados de enérgicas acções mecânicas, devido às fortes pressões que os gases exercem sobre as paredes das câmaras que os contêm assim como sobre os corpos vizinhos.

As substâncias explosivas, podem ser classificadas segundo a sua aplicação, como:

- Explosivos propriamente ditos, por exemplo para o carregamento de granadas.
- Substâncias propulsoras ou pólvoras, por exemplo para constituir as cargas propulsoras de projecteis.

⁵A *Commonwealth* é uma associação de 53 estados independentes que cooperam e colaboram no interesse comum dos seus povos e na promoção da compreensão e paz Mundial. A *Commonwealth* representa 1.8 mil milhões de habitantes, ou seja, cerca de 30% da população Mundial.

- Substâncias iniciadoras, para a confecção de artifícios, fulminantes, espoletas, etc.

Da classificação feita nos pontos anteriores destacam-se as pólvoras, que podem ser: (i) ordinárias ou negras; (ii) de guerra, caça ou minas; (iii) sem fumo ou (iv) progressivas. Quanto à composição química, as pólvoras são constituídas por nitrato de Potássio (75%), Carbono (12,5%) e Enxofre (12,5%).

A carga propulsiva dos projecteis deve satisfazer um conjunto de requisitos. De entre estes, os mais relevantes e por vezes contraditórios são: dar lugar a pressões e velocidades regulares e ter grande potência balística; ter uma fraca força expansiva; funcionar a uma temperatura não muito elevada; possuir fraco poder corrosivo e não originar gases deletérios, isto é, nocivos à saúde; ser de inflamação rápida e segura; exibir um processo de combustão progressiva; não dar origem quer a fumos quer a resíduos; ser de conservação fácil; ser estável, isto é, não se alterar sob acção do clima, dos corpos ou dos metais com que está habitualmente em contacto; ser de fácil fabrico; poder ser transportada sem perigo; ser seguro o seu emprego e manuseamento e ter baixo custo.

1.5.3 O Invólucro

O invólucro é constituído por uma peça metálica única. O metal usado na sua fabricação deve obedecer às seguintes condições essenciais: (i) ser maleável, para se adaptar de forma ideal às paredes da câmara; (ii) ser resistente, para evitar uma explosão sob a acção da pressão dos gases da pólvora; (iii) ter elevada capacidade de deformação elástica para, depois do tiro retomar as suas dimensões primitivas. Só deste modo fica facilitada a sua extracção da arma.

O invólucro, para além de alojar o fulminante e fixar o projectil, tem que servir também de contentor para a carga (e.g. pólvora). Durante a Segunda Guerra Mundial, utilizava-se o aço, Cobre ou até mesmo Ferro no fabrico do invólucro. Porém, actualmente, o metal empregue é o latão, por ser um material muito maleável. Nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidos invólucros de Alumínio.

De uma forma genérica, o invólucro é fabricado por meio de impressão, ou seja, comprime-se um disco de latão plano enformando-o a frio por intermédio de uma matriz que comprime lentamente a parte central, transformando o disco num cilindro oco. Na figura 1.7(a) mostram-se alguns exemplos de invólucros de projecteis de uso *comum*. Assim sendo, após as transformações referidas, o invólucro pode assumir geometria cilíndrica, se o estojo tem diâmetro constante em toda sua extensão; cónica, se o estojo tem diâmetro menor na boca (pouco comum); e de garrafa, se o estojo tem um estrangulamento ou gargalo. Na figura 1.7(b) mostram-se os diferentes tipos de invólucros de projecteis.

Os invólucros de geometria cilíndrica e cónica destinam-se, maioritariamente, a pistolas e pistolas-metralhadoras, enquanto que os invólucros de gargalo, devido à grande capacidade de carga interior, destina-se a espingardas.

Quanto à base do invólucro, pode ter as seguintes formas: com aro ou gola, se tem um ressalto na base; com semi-arco e virola, se tem um ressalto de pequenas proporções e uma ranhura; sem aro, se tem apenas a virola; e rebatido, se a base tem diâmetro inferior ao diâmetro do corpo do estojo.

1.5.4 O Fulminante

Fulminante é o nome atribuído ao artifício destinado a produzir a inflamação da carga. A inflamação da carga dá-se devido à substância explosiva que existe dentro de um pequeno vaso metálico, designado por cápsula, que é detonada pelo choque do percutor (ver figura 1.2).

Para que possa ser esmagada pelo percutor, a cápsula necessita de ser suficientemente flexível e com dureza bastante para resistir à perfuração. Neste sentido, as cápsulas são frequentemente

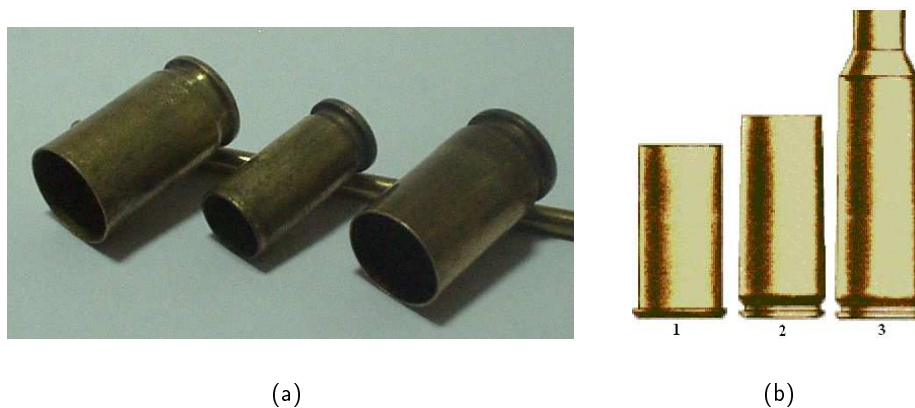


Figura 1.7: (a) Alguns exemplos de invólucros de projecteis de uso *comum* e (b) diferentes tipos de invólucros: 1 – cilíndrico, 2 – cónico e 3 – garrafa.

construídas em Cobre ou latão. De uma forma geral, o fulminante tem geometria cilíndrica e é colocada num alojamento aberto no centro da base do invólucro, de forma a garantir percussão central. Na figura 1.8(a) podem ver-se alguns fulminantes de uso *comum*.

A matéria detonante deve ser tal que não se altere com o tempo nem dê origem a fenómenos de combustão lenta, não devendo ainda reagir quimicamente com o metal da cápsula. Na generalidade das situações utilizam-se fulminantes à base de Mercúrio ou de cloreto de Potássio, ou ainda de uma mistura destes dois componentes. Os fulminantes de utilização mais frequente são: (i) o fulminante *boxer*, muito utilizado actualmente, tem a bigorna presa à espoleta (ver figura 1.2) e utiliza apenas um evento central, facilitando o desespoletamento do estojo na fase de recarga; (ii) o fulminante *berdan* é utilizado maioritariamente em armas de carácter militar (ver figura 1.8(b)). Neste, a bigorna é um pequeno ressalto no centro da base do estojo estando com dois ou mais eventos em seu redor e (iii) o fulminante *bateria*, utilizado frequentemente em cartuchos de caça, tem a bateria incorporada na espoleta de forma a tornar impossível a sua queda, facilitando o processo de recarga do estojo.

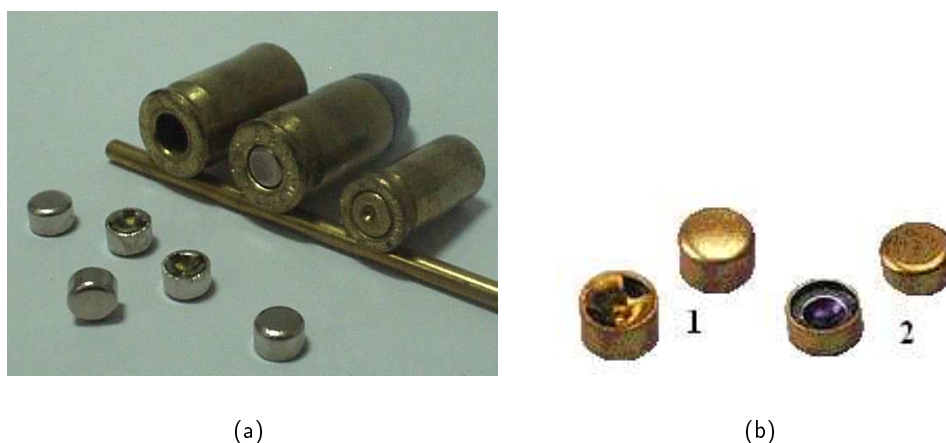


Figura 1.8: (a) Representação de alguns fulminantes de uso *comum* e (b) tipos de fulminantes: 1 – *boxer* e 2 – *berdan*

Na secção seguinte apresenta-se uma descrição detalhada da munição que será utilizada no

âmbito deste trabalho.

1.6 Calibre 9 mm Luger

“Se Vis Pacem Para Bellum” — Se queres a paz, prepara a guerra. Esta conhecida afirmação foi escrita pelo autor romano *Publius Flavius Vegetius Renatus* no ano 390 d.C. Mais tarde foi utilizada pelo fabricante alemão de armas *Deutsche Waffen und Munitionsfabriken* (DWM) e é a origem da palavra *Parabellum*, usada em inglês para designar algum tipo de armas de fogo e munições. Em 1902, na Alemanha, a DWM criou um cartucho com 9 mm de calibre para utilização na pistola militar Luger, daí a designação 9 mm Luger ou 9 mm Parabellum. Posteriormente, esta munição passou a ser utilizado por toda a Marinha e Exército alemães. Na figura 1.9 podem ver-se alguns exemplos de munições de calibre 9 mm Luger (9 mm Parabellum). Devido às suas características dinâmicas e balísticas, este cartucho foi o que obteve a maior aceitação pelas forças militares e policiais em todo o Mundo. É de salientar a elevada velocidade do seu projectil associada à dimensão reduzida do cartucho, possibilitando que armas muito compactas utilizem carregadores de grande capacidade. O conceito *wondernine*⁶ é utilizado para classificar armas com grande poder de fogo e/ou pequenas pistolas de calibre 9 mm com carregadores de elevada capacidade.



Figura 1.9: Alguns exemplos de munições de calibre 9 mm Luger (9 mm Parabellum).

O cartucho 9 mm Luger tem um poder de penetração significativo quando utilizado com projectil ogival totalmente encamisado. Porém, este projectil tem pequena deformabilidade, o que reduz o seu poder de paragem. No que diz respeito aos projecteis modernos, devido ao rendimento associado à grande velocidade do projectil que, ao chocar com o alvo, se deforma mais facilmente, o tipo ponta oca (EXPO) ou especiais (e.g. projecteis Norte-Americanos: Glaser, Silvertip, Black Talon, etc.) possui maior poder de paragem.

A munição 9 mm só é considerada como tendo um calibre aceitável para defesa quando utilizada com projecteis deformáveis. Caso contrário, transforma-se num projectil com boa capacidade perfurante, transmitindo a restante energia (em relação à energia inicial do disparo) para uma parede, um veículo ou uma vítima inocente, após atravessar o alvo.

Todas as razões e condicionantes explanados nos parágrafos anteriores justificam que se recorra a esta munição (projectil) para realizar os estudos de caracterização da performance balística de alvos metálicos.

⁶Este conceito surgiu nos Estados Unidos da América e é a contracção dos termos em língua Inglesa *wonder* (maravilha) e *nine* (nove).

1.7 Estado da Arte

Embora as propriedades mecânicas e de penetração tenha já sido estudadas extensivamente, apenas alguns autores focalizaram a sua atenção nos efeitos das propriedades mecânicas no desempenho balístico, isto é, na *performance* balística.

A resistência balística de um determinado material de armadura/protecção é caracterizada, de um modo geral, pelo inverso da densidade por unidade de área do material do alvo que é necessário para travar um determinado projectil, projectado a uma velocidade específica. Em tais actividades de desenvolvimento, invariavelmente, um grande número de experiências devem ser realizadas com diferentes tipos de ligas metálicas e respectivos procedimentos de tratamento térmico. Esta abordagem torna-se inevitável sempre que o conhecimento detalhado sobre a correlação entre as propriedades mecânicas e o desempenho balístico não esteja disponível. Mesmo que o conhecimento substancial das propriedades mecânicas esteja disponível para várias ligas, é desejável obter uma correlação aproximada com o desempenho balístico de forma a facilitar o desenvolvimento de armaduras e sistemas de protecção.

Consequentemente, como foi referido, o objectivo global deste trabalho é determinar o índice balístico de diversos materiais. Para atingir este objectivo será necessário tomar em consideração os vários mecanismos que operam durante a penetração do projectil no alvo, assim como o efeito de várias propriedades mecânicas no processo de absorção e dissipação de energia. É neste contexto que as primeiras investigações são revistas nos parágrafos que se seguem.

Vários têm sido os modelos utilizados nas últimas décadas para determinar a energia absorvida por uma armadura ou sistema de protecção no processo de retenção de um projectil. Taylor (1948) [20] determinou o trabalho realizado por um projectil no processo de penetração de um alvo, supondo que existe uma expansão radial de um furo cilíndrico de diâmetro igual ao projectil. Thompson (1955) [21] aprofundou e melhorou o modelo de Taylor (1948) passando a considerar também o trabalho realizado na formação da concavidade do material do alvo quando golpeado por projecteis rígidos.

Posteriormente, Awerbuch e Bodner (1974) [2] investigaram o processo de perfuração de uma placa metálica por um projectil rígido, propondo um modelo analítico que pode ser decomposto em três-estágios. No primeiro estágio, o movimento do projectil é retardado pelo fluxo plástico radial e pela resistência (inércia) do material do alvo. Durante o segundo estágio do modelo de Awerbuch e Bodner (1974) inicia-se a formação, por deformação, de uma rolha⁷ do material do alvo. No terceiro e último estágio, dá-se a ejeção por corte desta rolha.

No início dos anos 80 do Século XX Ravid e Bodner (1983) [15] propuseram uma nova evolução ao modelo de Awerbuch e Bodner (1974), em que se supõe uma análise bidimensional dividida em cinco estágios de penetração, a saber: uma primeira fase de penetração plástica dinâmica; o segundo estágio onde se considera a formação da protuberância devida ao impacto; um estágio de avanço da protuberância; a fase de formação da rolha e, finalmente, o estágio final de saída do projectil.

Numa análise de impacto a alta velocidade, Tate (1977) [19] recorreu a uma abordagem de escoamento plástico confinado enquanto que Backman e Goldsmith (1978) [3] estudaram os modos de dano predominantes que podem ocorrer durante os processos de penetração do projectil no alvo bem como a perfuração de diversos alvos. Em 1985, Landkof e Goldsmith (1985) [12] propuseram um modelo analítico para determinar a energia absorvida durante a perfuração de alvos metálicos finos por projecteis cilíndrico-cónicos. Para tal, basearam-se na teoria das dobradiças plásticas para estudar a formação das dobras das pétalas⁸. No final dos anos 80 do Século XX, James (1987)

⁷Do inglês *plug*.

⁸Na fase final de penetração e perfuração de um projectil num alvo metálico dúctil formam-se rasgos que se aparentam com pétalas.

[9] propôs uma teoria unificada de penetração, considerando ambas as teorias de formação de jactos e de dissipação de energia cinética. Na perfuração de alvos de Alumínio por hastes cónicas, Forrestal *et al.* (1987) [8] consideraram os efeitos radiais para calcular o volume que participa quer nos processos de deformação elástica e quer de deformação plástica.

Embora a mecânica de penetração tenha já sido estudada intensivamente, poucos autores focaram a sua atenção na influência das propriedades mecânicas no desempenho e *performance* balísticos. Tabor (1948) [18] considerou, nos seus cálculos, que a pressão eficaz é três vezes superior à força final do impacto. A influência do módulo de elasticidade (módulo de Young) nos esforços de impacto em alvos de Alumínio 2024 foi discutido por Sinha *et al.* (1977) [16]. Tate (1977) determinou que a força de fluxo é três vezes superior à tensão de limite de elasticidade (tensão de cedência) do material. Woodward (1978) [23] descreveu todo o processo de penetração de um projectil cónico determinando o trabalho realizado em função da tensão limite de elasticidade do material do alvo.

Porém, embora a determinação do desempenho do impacto de um projectil em alvos planos tenha sido já discutida em função da tensão limite de elasticidade por muitos investigadores (e.g. Bishop *et al.* 1945 [4], Taylor 1948 [20], Woodward 1978 [23], Corran *et al.* 1983 [5], Landkof e Goldsmith 1985 [12], Radin e Goldsmith 1988 [14]), alguns autores observaram que o simples aumento da força não é suficiente para determinar a resistência balística (Bishop *et al.* 1945 [4], Thompson 1955 [21], Tate 1977 [19], Jonas e Zukas 1978 [11], Longeope e Forrestal 1983 [13]). Esta observação deve-se ao facto de não ser considerado o efeito das restantes propriedades mecânicas na resistência balística do material do alvo.

Uma vez que o foco do trabalho que aqui se apresenta é a compreensão dos efeitos das propriedades mecânicas mais comuns (tais como a tensão limite de elasticidade, a tensão de ruptura, o alongamento na ruptura e o módulo de elasticidade) no desempenho e *performance* balística de alvos metálicos, adoptou-se uma abordagem diferente da referida nos parágrafos anteriores. Apesar de o modelo de absorção de energia ser muito semelhante aos propostos pelos autores referidos, enquanto que estes centraram a sua atenção nos parâmetros que não dependem do material do alvo, tais como a geometria do projectil e do alvo e parâmetros balísticos como a velocidade, a ênfase deste trabalho são os parâmetros dos materiais. Adicionalmente, importa referir que este trabalho não visa estabelecer o limite balístico, mas sim determinar a qualidade balística de materiais metálicos frequentemente utilizados sistemas de armamento e de protecção.

1.8 Guia de leitura

O trabalho que aqui se apresenta divide-se em quatro partes distintas: o Enquadramento, a Modelação Analítica, a Modelação Numérica e a parte final onde se apresenta a Discussão e as Conclusões. Por sua vez, cada uma destas partes está dividida em capítulos.

Como foi referido, na primeira parte deste trabalho faz-se o Enquadramento do tema da dissertação. Esta parte compreende apenas um capítulo onde se faz uma introdução ao trabalho e se descrevem os objectivos globais. Neste capítulo faz-se também uma apresentação resumida sobre armas de fogo e constituintes das munições.

A segunda parte - a Modelação Analítica - é composta por um capítulo. No Capítulo 2 descrevem-se as relações que deram origem ao modelo analítico de cálculo da *performance* balística, sendo para tal necessário calcular as fracções de espessura do alvo assim como as componentes de energia elástica, plástica e cinética. Consequentemente, torna-se possível calcular o índice (ou mérito) balístico e proceder à respectiva validação. Neste capítulo é também possível analisar os resultados obtidos pela implementação do modelo analítico recorrendo ao uso do *software* Matlab.

No Capítulo 3 expõem-se os princípios básicos da formulação do Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicada à mecânica dos meios contínuos e por uma breve explicação do *software* de

simulação Abaqus utilizado para realizar as simulações numéricas com e sem implementação da formulação de dano do modelo de Johnson-Cook, começando assim a parte da Modelação Numérica. A descrição dos ensaios realizados sobre os alvos de Alumínio e Magnésio, para espessuras compreendidas entre 10 e 20 mm, com projectil rígido, deformável e incorporando o modelo de dano de Johnson-Cook, encontra-se no Capítulo 4, assim como a caracterização dos materiais usados em cada ensaio. No Capítulo 5, que finaliza esta parte, apresenta-se, analisa-se e comparam-se os resultados numéricos obtidos nas simulações numéricas com o Abaqus.

Por fim, no Capítulo 6, na parte de Discussão e Conclusões são discutidos os resultados obtidos com os vários tipos de ensaios realizados, através das distribuições de tensões e deformações atingidas em cada alvo. No capítulo 7 faz-se uma comparação entre os modelos analítico e numérico, através da profundidade de penetração (DoP).

Parte II

Modelação Analítica

Capítulo 2

Modelos analíticos de *performance* balística

Apresentam-se o modelo analítico para o cálculo da *performance* balística, sendo para tal necessário calcular as fracções de espessura do alvo e as suas componentes de energia elástica, plástica e cinética. Descreve-se a metodologia de cálculo do índice (ou mérito) balístico e a sua validação. Este capítulo refere-se também aos resultados obtidos através da implementação do modelo analítico para os ensaios realizados sobre os alvos com as ligas de Alumínio AA5083-H32 e Magnésio AZ31B-H24, para projectil rígido, deformável e recorrendo ao modelo de dano de Johnson-Cook, usando o Matlab.

2.1 Introdução

Nas secções que se seguem, apresentam-se os formalismos matemáticos e analíticos necessários para a determinação a profundidade de penetração e a *performance* balística de materiais metálicos utilizados no desenvolvimento de armaduras e sistemas de protecção. Para atingir este objectivo recorre-se a uma aproximação de balanço energético, assumindo que a energia cinética do projectil é totalmente absorvida pela deformação elástica e plástica envolvida no processo de penetração e pela energia cinética transmitida ao material do alvo, durante o processo de deformação [17].

O modelo apresentado supõe dois estágios de deformação distintos, evidentes durante a fase de penetração do projectil no alvo. Na zona do alvo que sofre impacto de forma directa, assume-se que o material flui na direcção radial, numa região de deformação limitada, designada por região I. Porém, desenvolve-se também deformação na direcção longitudinal até à superfície traseira do alvo. Nesta zona não-limitada, designada por região II, torna-se evidente uma deformação que se desenvolve na face do alvo oposta ao impacto. A representação esquemática destas duas regiões pode ser vista na figura 2.1.

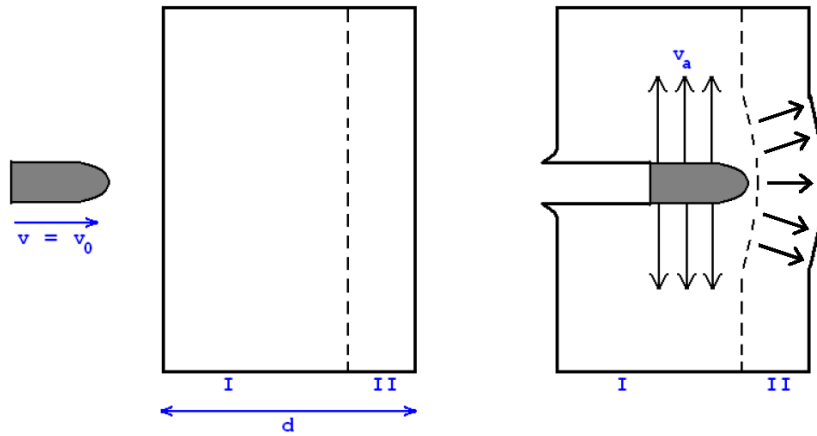


Figura 2.1: Representação esquemática da zona confinada (região I) e não-confinada (região II).

2.2 Dimensão das zonas de impacto

Na análise que aqui se apresenta, assume-se uma velocidade representativa constante ao longo de toda a espessura do alvo. De acordo com o modelo proposto por Taylor [?] esta velocidade, v_a , é metade da velocidade de impacto no alvo, v_0 , isto é,

$$v_a = \frac{v_0}{2}. \quad (2.1)$$

Assume-se que a primeira região — região I — se estende na espessura do alvo até à profundidade em que deixa de se fazer sentir a cavidade provocada pelo projétil. De acordo com Eichelberger 1956 [6] e Allen e Rogers 1961 [1], o valor mínimo de tensão para produzir a cavidade é aproximadamente igual a $2,6\sigma_y$, onde σ_y é a tensão limite de elasticidade do material do alvo¹.

Para determinar a velocidade longitudinal da onda de choque elástica é necessário calcular o parâmetro adimensional k_γ do seguinte modo

$$k_\gamma = \sqrt{\frac{1 - \gamma}{(1 - 2\gamma)(1 + \gamma)}}, \quad (2.2)$$

onde γ é o coeficiente de Poisson do material. Assim, a velocidade longitudinal da onda de choque elástica no material do alvo é dada pela expressão

$$c_e = k_\gamma \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (2.3)$$

em que E é o módulo de elasticidade² e ρ a densidade do material do alvo. Para calcular a velocidade do projétil na interface entre as regiões I e II, v_1 , é necessário conhecer a densidade, ρ , a velocidade elástica longitudinal de onda, c_e , e a tensão limite de elasticidade do material, σ_y , e recorre-se à expressão

$$v_1 = \frac{-\rho c_e + \sqrt{\rho^2 c_e^2 + 10,4\rho\sigma_y}}{2\rho}. \quad (2.4)$$

Deste modo, torna-se possível obter o valor da espessura relativa de ambas as regiões do alvo, isto é,

$$\alpha_1 = 1 - \sqrt{\frac{v_1}{v_0}} \quad \text{e} \quad \alpha_2 = 1 - \alpha_1. \quad (2.5)$$

¹Também designada por tensão de cedência.

²Também designado por módulo de Young.

2.3 Energia elástica do impacto

As energias elásticas absorvidas nas regiões confinada — região I — e não-confinada — região II — são diferentes. Como tal, têm que ser calculadas separadamente. Nos parágrafos seguintes explana-se o procedimento de cálculo da energia elástica. Este procedimento é ilustrado no diagrama explicativo da figura 2.2.

2.3.1 Zona confinada — Região I

Na parte do alvo que sofre impacto directamente, a região I, assume-se um estado plano de tensão e considera-se que o material flui no sentido radial. Na face oposta do alvo, a região II, a deformação do alvo ajuda a reduzir a velocidade do projectil. As espessuras relativas destas duas regiões calculam-se através da redução da velocidade do projectil. Este aspecto foi explicado em detalhe na Secção 2.2.

Na figura 2.2 pode ver-se uma representação esquemática das regiões plástica e elástica no alvo, após o impacto. Nesta figura, r_e é a distância radial coberta pela frente da onda elástica e pode ser calculado recorrendo à expressão

$$r_e = (c_b + v_a)t, \quad (2.6)$$

onde v_a é a velocidade representativa da partícula, t o tempo e r_0 o raio do projectil, dado por,

$$r_0 = v_a t. \quad (2.7)$$

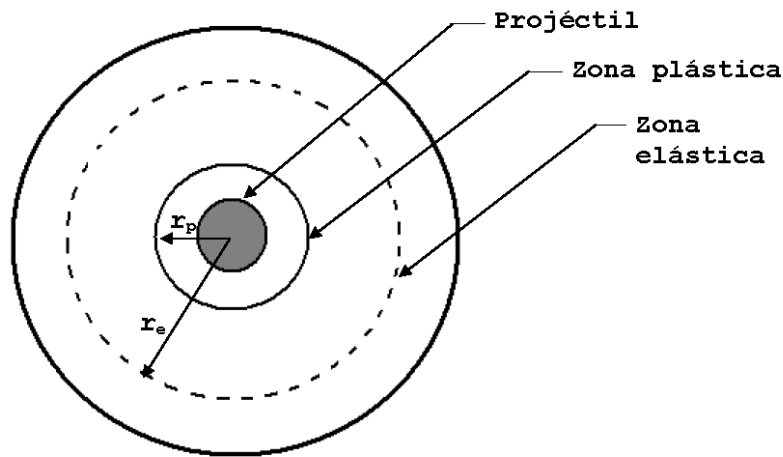


Figura 2.2: Representação esquemática da região plástica e elástica no alvo após o impacto.

A deformação volumétrica δ_V pode ser calculada como

$$\delta_V = \frac{\Delta V}{V} = \left(\frac{r_0}{r_e} \right)^2. \quad (2.8)$$

O módulo volumétrico do material do alvo, K , pode ser calculado em função da velocidade da onda elástica, c_b , ou seja,

$$K = c_b^2 \rho. \quad (2.9)$$

Na zona confinada (região I) o material do alvo fica sujeito a um estado de tensão hidrostático. Neste caso, a energia absorvida específica, ou seja, por unidade de volume, é dada por

$$U_e^I = \frac{1}{2} K \left(\frac{\Delta V}{V} \right)^2, \quad (2.10)$$

Por outro lado, o volume de material do alvo que participa nesta componente de deformação é um volume cilíndrico que pode ser determinado do seguinte modo:

$$V_e^I = \pi(c_b + v_a)^2 t^2 \alpha_1 d. \quad (2.11)$$

Manipulando as expressões anteriores, a energia elástica total absorvida pela zona confinada do alvo, a região I, pode ser expressa como

$$\psi_e^I = \pi t^2 \rho d v_a^4 \left[\frac{\alpha_1}{2(1 + k_b)^2} \right], \quad (2.12)$$

onde d é a espessura total do alvo e k_b é um parâmetro adimensional definido pela a velocidade v_a , e pela velocidade de onda elástica, c_b , isto é,

$$k_b = \frac{v_a}{c_b}. \quad (2.13)$$

2.3.2 Zona não-confinada — Região II

Segundo Johnson 1972 [10], a energia absorvida pela zona não-confinada do alvo — a região II — pode ser determinada recorrendo a um procedimento em tudo idêntico ao seguido na Secção 2.3.1, exceptuando o cálculo da energia específica e do volume que participa na deformação correspondente, dados pelas expressões

$$U_e^{II} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_y^2}{E} \right) \quad (2.14)$$

e

$$V_e^{II} = \pi(c_e + v_a)^2 t^2 \alpha_2 d, \quad (2.15)$$

respectivamente. Assim, a energia elástica total absorvida pela zona não-confinada do alvo, a região II, pode ser calculada recorrendo à relação

$$\psi_e^{II} = \pi t^2 \rho d v_a^4 \left[\frac{\alpha_2 k_j^2 (1 + k_e)^2}{2 k_j^2} \right], \quad (2.16)$$

em que k_j e k_e são parâmetros adimensionais, dados pelas expressões [10]

$$k_j = \frac{\rho v_a^2}{\sigma_y} \quad \text{e} \quad k_e = \frac{v_a}{c_e}. \quad (2.17)$$

2.4 Energia absorvida por deformação plástica

A energia absorvida por deformação plástica pode ser calculada de forma idêntica ao descrito na Secção 2.3.2, excepção feita aos parâmetros elásticos, que deverão ser substituídos pelos correspondentes parâmetros plásticos. Adicionalmente, se só a deformação angular plástica for considerada, não é necessário calcular a energia absorvida por deformação plástica para as regiões I e II separadamente. A zona plástica do alvo está representada esquematicamente na figura 2.2.

Seguindo o raciocínio descrito na Secção 2.3.2, é necessário determinar os parâmetros adimensionais k_j e k_p , recorrendo às expressões

$$k_j = \frac{\rho v_a^2}{\sigma_y} \quad \text{e} \quad k_p = \frac{v_a}{c_p}. \quad (2.18)$$

O módulo plástico E_p , que depende da velocidade da onda plástica, c_p , da densidade do material do alvo, ρ e da deformação plástica ε_p pode determinar-se como

$$E_p = c_p^2 \rho. \quad (2.19)$$

A deformação plástica é

$$\varepsilon_p = \frac{v_a}{c_p + v_a}. \quad (2.20)$$

O valor da velocidade da onda plástica, c_p , é dado por [?]

$$c_p = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} \right)_p}. \quad (2.21)$$

Porém, segundo Johnson [10], o valor de c_p é aproximadamente constante e igual a

$$c_p = 1,12 v_0 \quad (2.22)$$

A energia plástica absorvida por unidade de volume pode ser aproximada pela área abaixo da curva bilinear tensão-deformação, ou seja, pode ser calculada recorrendo à expressão seguinte:

$$U_p = \sigma_y \varepsilon + \frac{1}{2} E_p \varepsilon^2. \quad (2.23)$$

O volume que participa na deformação plástica é calculado como

$$V_p = \pi (c_p + v_a)^2 t^2 d. \quad (2.24)$$

Consequentemente, a energia total devida à deformação plástica é dada pela expressão

$$\psi_p^{I,II} = \pi t^2 \rho d v_a^4 \left[\frac{1}{k_j} \left(1 + \frac{1}{k_p} \right) + \frac{1}{2k_p^2} \right]. \quad (2.25)$$

2.5 Energia cinética transferida ao alvo

A energia cinética transferida para o material do alvo é significativa somente na zona plástica. Esta energia torna-se insignificante na zona de deformação puramente elástica. Uma vez que a velocidade da partícula atribuída ao material do alvo é v_a , como discutido na Secção 2.2, a energia cinética específica (*i.e.* por unidade de volume) do material do alvo é

$$U_{ke} = \frac{1}{2} \rho v_a^2. \quad (2.26)$$

O volume de material do alvo que participa neste processo de deformação é o definido pela equação 2.24, isto é,

$$V_p = \pi (c_p + v_a)^2 t^2 d.$$

e, consequentemente, a energia cinética total atribuída ao material do alvo calculada com a expressão global

$$\psi_{ke}^{I,II} = \frac{1}{2} \pi t^2 \rho d v_a^4 \left(1 + \frac{1}{k_p} \right)^2, \quad (2.27)$$

em que k_p é, mais uma vez, um parâmetro adimensional dado por

$$k_p = \frac{v_a}{c_p}.$$

2.6 Índice de *performance* balística

A energia total absorvida por todos os modos descritos nas secções anteriores é calculada pela soma das respectivas componentes de energia, ou seja,

$$\psi = \psi_e^I + \psi_e^{II} + \psi_p^{I,II} + \psi_{ke}^{I,II}. \quad (2.28)$$

Consequentemente, após manipulação algébrica das expressões globais definidas nos parágrafos anteriores, a energia total absorvida específica por unidade de área do alvo, $\bar{\psi}$, deverá ser calculada recorrendo à seguinte expressão:

$$\bar{\psi} = \frac{\psi}{\rho d} = \frac{1}{2} \pi t^2 v_a^4 \left[\frac{\alpha_1}{(1 + k_b)^2} + \alpha_2 \frac{k_\gamma^2 (1 + k_e)^2}{k_j^2} + \frac{2}{k_j} \left(1 + \frac{1}{k_p} \right) + \frac{1}{k_p^2} + \left(1 + \frac{1}{k_p} \right)^2 \right]. \quad (2.29)$$

Os termos dentro de parêntesis rectos no membro direito da expressão 2.29 correspondem exclusivamente às propriedades mecânicas e à velocidade. Assim, estas parcelas são apropriadas e ideais para caracterizar a qualidade — isto é, a *performance* balística — do material do alvo. Consequentemente, o mérito balístico pode ser expresso como

$$\phi = \left[\frac{\alpha_1}{(1 + k_b)^2} + \alpha_2 \frac{k_\gamma^2 (1 + k_e)^2}{k_j^2} + \frac{2}{k_j} \left(1 + \frac{1}{k_p} \right) + \frac{1}{k_p^2} + \left(1 + \frac{1}{k_p} \right)^2 \right]. \quad (2.30)$$

As primeiros duas parcelas do membro direito da expressão anterior representam as componentes elásticas. As terceira e quarta parcelas representam as componentes plásticas. A última parcela designa a componente da energia cinética. Uma vez que todas as parcelas no membro direito da equação 2.30 são parâmetros adimensionais, também ϕ é um parâmetro adimensional. O valor deste parâmetro ϕ é frequentemente normalizado em relação ao aço macio, isto é, o valor de ϕ para os restantes materiais é determinado a partir deste.

2.7 Validação e discussão

De forma a testar a utilidade e aplicabilidade do índice proposto na Secção 2.6, considera-se o desempenho balístico de duas ligas: a liga de Alumínio AA5083-H32 e a liga de Magnésio AZ31B-H24. Para analisar a *performance* balística destas duas ligas, recorreu-se à equação empírica de Thor (1961, 1963) [22], dada por

$$v_s = 10^c h^\alpha m_s^\beta (\sec \theta)^\gamma v_s^\lambda, \quad (2.31)$$

onde v_s é a velocidade de impacto do projectil, h é a espessura do alvo em polegadas, m_s é o peso do tiro original em grãos, θ é o ângulo de inclinação do impacto e c , α , β , γ e λ são constantes do material para a equação de Thor.

Em todos os casos, usam-se resultados que correspondem a uma velocidade de impacto do projectil $v = 408 \text{ ms}^{-1}$. Enquanto os cálculos de α_1 , α_2 , k_e , k_b , k_γ e k_j são simples e fáceis, tal não acontece no caso de k_p . Preferencialmente, a velocidade da onda plástica deve ser determinada usando a inclinação da curva real de tensão-deformação. Porém, se tal não for possível pode-se determinar usando a seguinte equação:

$$\sigma_u^* = \sigma_u \left[1 + \frac{\% \text{ alongamento}}{100} \right]. \quad (2.32)$$

Por outro lado, o módulo plástico pode ser determinado recorrendo à expressão

$$E_p = \frac{\sigma_u^* + \sigma_u}{\% \text{ alongamento}} \times 100. \quad (2.33)$$

Para calcular o módulo volumétrico usou-se a equação padrão

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\gamma)}. \quad (2.34)$$

2.8 Matlab

Para implementar os modelos analíticos de determinação da *performance* balística de alvos metálicos, assim como de cálculo da respectiva profundidade de perfuração recorreu-se ao MATLAB.

O MATLAB é um programa de cálculo, cuja designação tem origem na conjugação dos termos “MATrix” e “LABoratory”, desenvolvido pela empresa MathWorks. O MATLAB é um *software* matemático que permite a execução de algoritmos numéricos sobre matrizes, processamento de sinal, integra análise numérica e construção de gráficos com o mínimo de programação. Ao contrário das linguagens de programação tradicionais, no MATLAB problemas e soluções são expressos praticamente da mesma forma que são escritos matematicamente.

O sistema interativo MATLAB é constituído pelas seguintes partes: linguagem, ambiente de trabalho, gráficos e *toolboxes*. O MATLAB segue de um modo muito fiel a maior parte dos aspectos das linguagens que lhe deram origem (C, Java e Basic), tornando-se numa linguagem de fácil programação. A título de exemplo, a criação de matrizes pode ser realizada de forma rápida e muito intuitiva. Adicionalmente, como este sistema possui um grande número de funções pré-programadas, a resolução de problemas é também conseguida de forma eficiente.

O MATLAB é um *software* numérico de elevado desempenho que oferece um ambiente de fácil utilização assim como permite a gestão, visualização, leitura e gravação de variáveis. Os gráficos criados pelo MATLAB podem ser a duas ou três dimensões e, muito pouco tempo depois da primeira utilização, qualquer utilizador pode criar, gerar e manipular gráficos com facilidade. O MATLAB pode ser utilizado áreas de cálculo científico muito diversas, tais como, por exemplo, a estatística, o processamento de sinal, o processamento de imagem, o controlo, o cálculo simbólico, *etc.*

No ano de 2004, o *software* MATLAB era já utilizado por mais de um milhão de pessoas, quer na indústria quer em universidades de todo o Mundo.

2.9 Resultados analíticos

Para o cálculo anlítico foi necessário introduzir alguns valores próprios para cada ensaio, entre os quais a velocidade de impacto, v_0 , a tensão de cedência, σ_y , a densidade, ρ , a espessura total do alvo, d , o tempo necessário para anular a velocidade, t , o coeficiente de Poisson, γ , o módulo de Young, E e a velocidade da onda plástica, c_p (ver tabela 2.1).

Tabela 2.1: Propriedades físicas e mecânicas da ligas de Alumínio AA5083-H32 e de Magnésio AZ31B-H24.

Propriedades	Alumínio AA5083-H32	Magnésio AZ31B-H24
Densidade [g/cm ³]	2,66	1,77
Tensão de cedência [MPa]	250	220
Tensão de ruptura [MPa]	320	290
Deformação [%]	10,0	15,0
Módulo de Young [GPa]	70,3	45,0
Coeficiente de Poisson	0,330	0,350

Nos parágrafos seguintes são apresentados os resultados analíticos obtidos para os vários ensaios realizados, sendo estes com alvos de liga de Alumínio AA5083-H32 e Magnésio AZ31B-H24 considerando primeiramente o projétil rígido, seguido por projétil de deformável em Cobre e ainda considerando o modelo de dano de Johnson-Cook.

2.10 Alvo deformável e projétil rígido

Para o cálculo analítico das energias absorvidas pelos alvos de Alumínio e Magnésio, em que foi considerado o projétil como um corpo rígido, os parâmetros usados encontram-se na tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dados de cálculo para os alvos de Alumínio e Magnésio considerando o projétil rígido.

Materiais	Espessura do do alvo [mm]	Tempo [s]	Velocidade do projétil [m/s^{-1}]	Velocidade da onda plástica [m/s^{-1}]
Alumínio AA5083-H32	20	0,0058	408	456,96
	15	0,0092		
	10	0,0074		
Magnésio AZ31B-H24	20	0,009865	408	456,96
	15	0,008		
	10	0,00275		

Assim, os resultados obtidos para cada alvo são demonstrados nos gráficos das figuras 2.3 e 2.4, para a energia elástica total absorvida na região I ($\psi_e^I = U_{el}(I)$), para a energia elástica total absorvida na região II ($\psi_e^{II} = U_{el}(II)$), para a energia total devido à deformação plástica ($\psi_p^{I,II} = U_{pl}(I,II)$) e para a energia cinética atribuída ao material do alvo ($\psi_{ke}^{I,II} = U_{ke}(I,II)$).

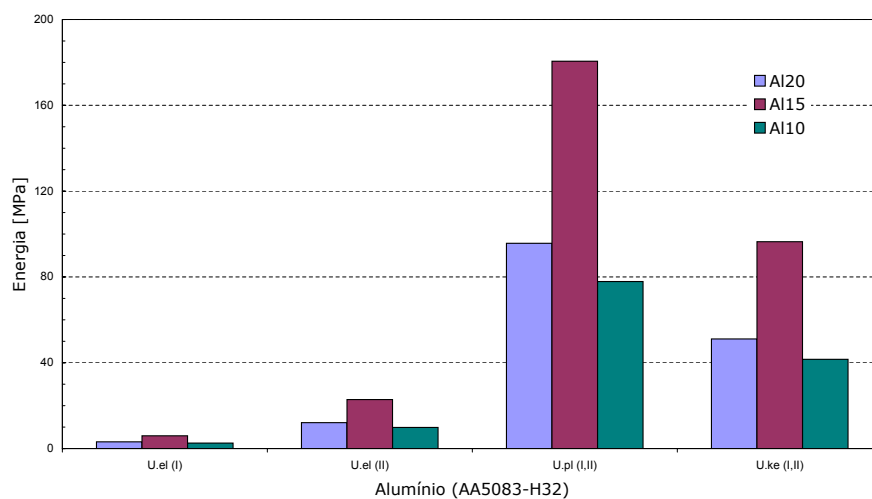


Figura 2.3: Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Alumínio com projétil rígido.

Examinando os dois gráficos referentes aos ensaios com o projétil rígido verifica-se que no alvo de Alumínio o alvo que absorveu mais energia foi o alvo com espessura $d = 15$ mm, enquanto que nos alvos de Magnésio verifica-se que a energia absorvida diminui com a diminuição da espessura do alvo.

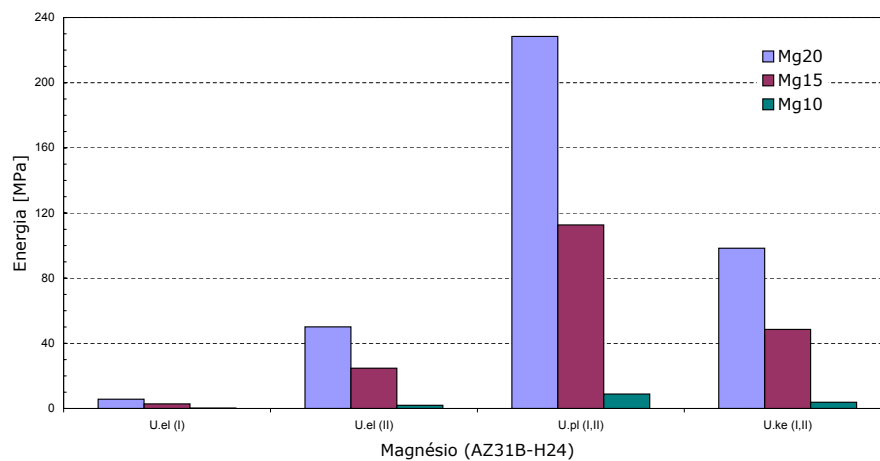


Figura 2.4: Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Magnésio com projectil rígido.

2.11 Alvo e projectil deformáveis

Para o cálculo analítico dos alvos de Alumínio e Magnésio em que foi considerado o projectil como um corpo deformável de Cobre, os parâmetros usados encontram-se na tabela 2.3.

Tabela 2.3: Dados de cálculo analítico para os alvos de Alumínio e Magnésio considerando o projectil deformável.

Materiais	Espessura do do alvo [mm]	Tempo [s]	Velocidade do projectil [m/s ⁻¹]	Velocidade da onda plástica [m/s ⁻¹]
Alumínio (AA5083-H32)	20	0,0092	408	456,96
	15	0,0096		
	10	0,01		
Magnésio (AZ31B-H24)	20	0,0097	408	456,96
	15	0,0079		
	10	0,00955		

Assim, os resultados obtidos para cada alvo são os que se mostram nos gráficos das figuras 2.5 e 2.6, para a energia elástica total absorvida na região I ($\psi_e^I = U_{el}(I)$), para a energia elástica total absorvida na região II ($\psi_e^{II} = U_{el}(II)$), para a energia total devido à deformação plástica ($\psi_p^{I,II} = U_{pl}(I,II)$) e para a energia cinética atribuída ao material do alvo ($\psi_{ke}^{I,II} = U_{ke}(I,II)$).

Examinando os resultados apresentados nos dois gráficos referentes aos ensaios com o projectil deformável, verifica-se que em ambos os casos há uma diminuição das energias absorvidas com a diminuição da espessura. Verific-se uma redução mais gradual para os alvos de Alumínio, visto que para o alvo de Magnésio há uma grande diminuição do alvo de espessura 20 mm para o alvo de espessura 15 mm, sendo este último muito semelhante para o alvo de 10 mm.

2.12 Ensaaios com Johnson-Cook

No presente capítulo foram efectuados os cálculos analíticos sobre alvos de Alumínio e Magnésio, em que foi considerado o projectil como um corpo deformável de Cobre e usado o modelo de dano

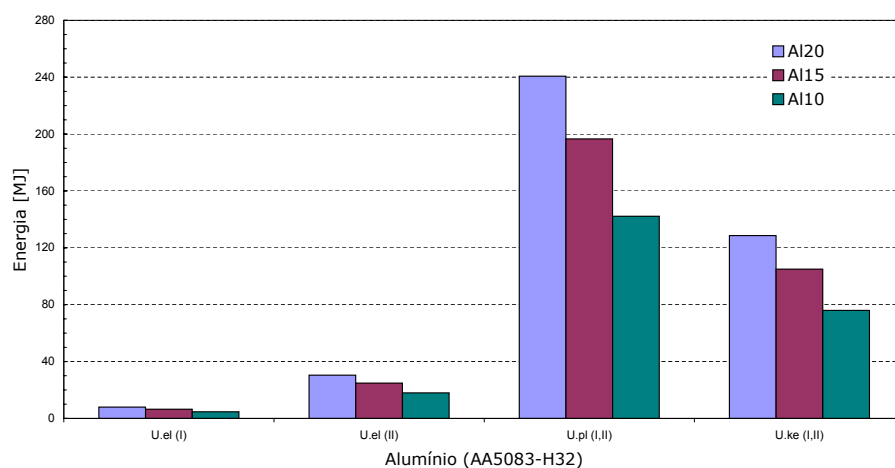


Figura 2.5: Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Alumínio com projectil deformável.

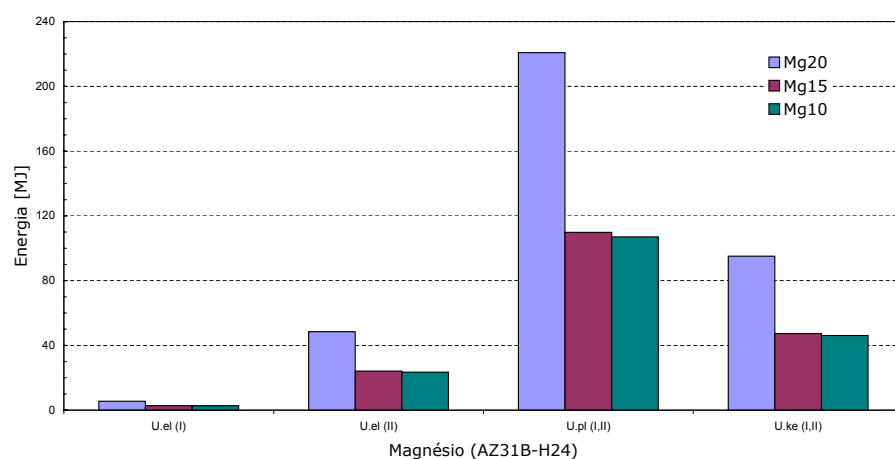


Figura 2.6: Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Magnésio com projectil deformável.

de Johnson-Cook, cujos parâmetros se encontram na tabela 2.4.

Tabela 2.4: Dados para o cálculo analítico para os alvos de Alumínio e Magnésio considerando o modelo de dano de Johnson-Cook.

Materiais	Espessura do do alvo [mm]	Tempo [s]	Velocidade do projectil [m/s ⁻¹]	Velocidade da onda plástica [m/s ⁻¹]
Alumínio (AA5083-H32)	20	0,0095	408	456,96
	15	0,00955		
	10	0,00965		
Magnésio (AZ31B-H24)	20	0,0064	408	456,96
	15	0,0012		
	10	0,00985		

Assim, os resultados obtidos para cada alvo são os que se apresentam nos gráficos das figuras 2.7 e 2.8, para a energia elástica total absorvida na região I ($\psi_e^I = U_{el}(I)$), para a energia elástica total absorvida na região II ($\psi_e^{II} = U_{el}(II)$), para a energia total devido à deformação plástica ($\psi_p^{I,II} = U_{pl}(I,II)$) e para a energia cinética atribuída ao material do alvo ($\psi_{ke}^{I,II} = U_{ke}(I,II)$).

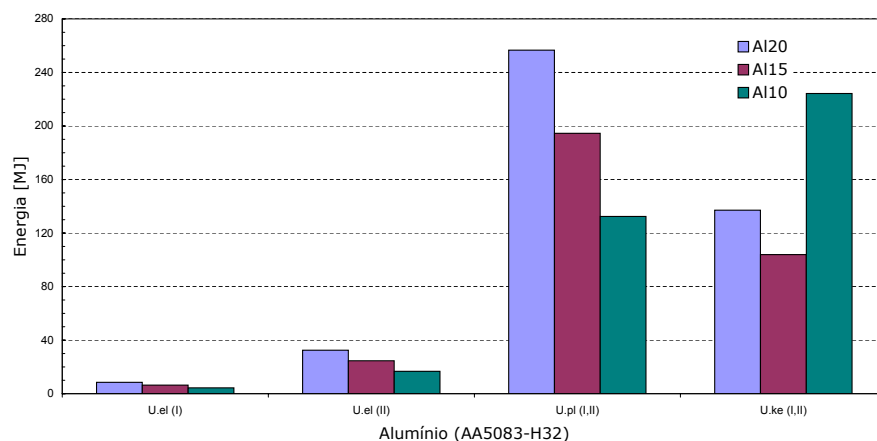


Figura 2.7: Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Alumínio com projectil deformável recorrendo ao modelo de dano de Johnson-Cook.

No gráfico de resultados correspondente ao alvo de Alumínio, observa-se uma redução das componentes de energia elástica e plástica com a diminuição da espessura no alvo, sendo que para a energia cinética o mesmo não acontece, visto que é no alvo de espessura de 10 mm que é absorvida maior quantidade de energia cinética.

No que diz respeito ao alvo de Magnésio, verifica-se que o alvo de espessura $d = 10$ mm absorve maior quantidade de energia, seguido do alvo de espessura 20 mm, sendo que a maior diferença existe entre estes e o alvo de 15 mm, que absorve muito menos energia.

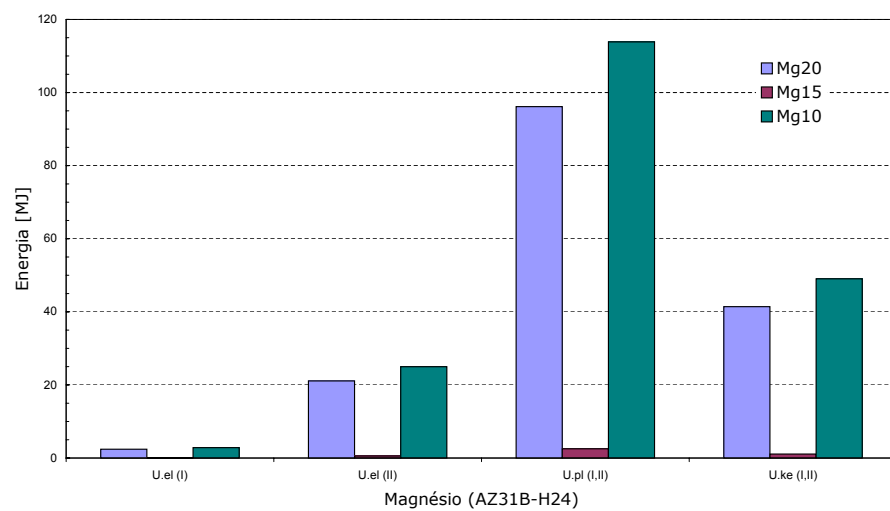


Figura 2.8: Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Magnésio com projétil deformável recorrendo ao modelo de dano de Johnson-Cook.

Parte III

Modelação Numérica

Capítulo 3

Análises pelo Método dos Elementos Finitos

Neste capítulo expõem-se os princípios básicos da formulação do Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicada à mecânica dos meios contínuos. Descreve-se brevemente o *software* Abaqus, utilizado para realizar as simulações numéricas com e sem implementação do modelo de dano de Johnson-Cook.

3.1 Introdução

Nos parágrafos que se seguem apresenta-se uma introdução resumida ao métodos dos elementos finitos, ferramenta fulcral para realizar todas as simulações de impacto balístico.

No final do Século XVIII, Gauss propôs, pela primeira vez, a utilização de funções de aproximação para resolver problemas matemáticos, criando as bases para o desenvolvimento do Método dos Elementos Finitos, frequentemente designado por MEF. No século seguinte pouco se evoluiu nesta matéria, essencialmente devido à complexidade existente no processamento de equações algébricas. Porém, aproximadamente em 1950, avanços tecnológicos como, por exemplo, o aparecimento da computação, levou a desenvolvimentos significativos do MEF, permitindo a resolução de sistemas de equações complexas. Foi na década de 50 do Século XX que o método dos elementos finitos se desenvolveu, acima de tudo pelas necessidades manifestadas pela indústria aeroespacial como, por exemplo, a Boeing e a Bell Aerospace¹ nos Estados Unidos e a Rolls-Royce no Reino Unido.

Em 1956 Turner *et al.* publicaram um artigo científico onde propuseram e implementaram as principais ideias base de um método de análise estrutural muito idêntico ao método de elementos finitos. Porém, a publicação mais antiga conhecida em que aparecem, pela primeira vez, os termos “elementos finitos” data de 1960 e foi escrita por Clough, professor da Universidade de Berkeley e simultaneamente funcionário da Boeing [7].

Foi essencialmente durante as décadas de 60 e 70 do Século XX que o método dos elementos finitos teve os desenvolvimentos mais significativos, que levaram ao formato que apresenta hoje em dia maior aceitação. Inicialmente, os elementos finitos mais utilizados eram os triangulares e tetraédricos. Posteriormente, começaram a utilizar-se mais amplamente, os quadriláteros e hexaédricos.

¹A Bell Aerospace foi entretanto extinta.

Devido à grande quantidade de cálculos que é necessário realizar quando se recorre ao método de elementos finitos, nomeadamente os envolvidos na resolução de sistemas de equações lineares de grandes dimensões, o MEF difere de outros métodos numéricos mais antigos por necessitar sempre de, pelo menos, um computador. Consequentemente, com a generalização da utilização dos computadores, o MEF tem vindo a ter uma evolução e aperfeiçoamento significativo nas últimas décadas.

Actualmente, o método dos elementos finitos é aplicado em áreas de investigação e desenvolvimento tecnológico tão diversas como, por exemplo, todas as áreas da engenharia, a medicina, a geologia e biologia, a ciência dos materiais, etc.

3.2 O método dos elementos finitos

Actualmente, grande parte das actividades de investigação e desenvolvimento tecnológico na generalidade das áreas de engenharia recorre a um vasto conjunto de ferramentas numéricas e computacionais que facilitam as tarefas de projecto e optimização em engenharia.

De uma forma geral, o método dos elementos finitos (MEF) pode ser definido como um método matemático de análise que se baseia na discretização (subdivisão) de um meio contínuo em elementos que mantêm as propriedades do meio que lhes deu origem. O comportamento destes elementos — os elementos finitos — é descrito por conjuntos de equações diferenciais com as quais se torna possível deduzir o comportamento do meio contínuo.

Quando se pretende simular o comportamento de sistemas reais complexos, o método dos elementos finitos é o método numérico (por oposição aos métodos analíticos) mais amplamente divulgado e utilizado. Este método pode ser utilizado para obter resultados para uma variedade de problemas abrangente, envolvendo análise de tensões e deformações, transferência de calor, electromagnetismo, comportamento de fluidos, etc. Com a complexidade dos problemas a resolver torna-se muitas vezes necessário recorrer a meios computacionais consideráveis.

A abordagem ao método dos elementos finitos inicia-se pela definição do modelo geométrico do meio que se pretende analisar, modelando-a graficamente num programa de CAD².

Seguidamente procede-se à fase de discretização do meio em elementos finitos, recorrendo a programas específicos como, por exemplo, o ABAQUSTM ou o FEMAPTM. Os elementos finitos podem assumir geometrias como, por exemplo, os tetraédros e hexaédros.

Os nós da malha de elementos finitos são pontos nos vértices dos elementos e são os pontos de ligação entre os elementos. A título de exemplo, num problema de cálculo estrutural, os deslocamentos dos nós da malha de elementos finitos definem os graus de liberdade do problema. Posteriormente, definem-se as propriedades físicas e mecânicas de cada componente do modelo. Estas propriedades são determinantes para garantir que o comportamento do modelo numérico corresponde à realidade.

A definição dos modelos de comportamento dos materiais é de grande importância para garantir que os resultados obtidos são razoáveis. Na área do cálculo estrutural, os modelos de comportamento dos materiais, frequentemente designados por modelos constitutivos, podem ser de diversos tipos como, por exemplo: (i) elástico (linear), em que depois da aplicação das cargas o material retoma a sua condição inicial de deformação nula; (ii) plástico (não-linear), em que parte da deformação tem carácter permanente; (iii) elasto-plástico, que corresponde a uma fase inicial de comportamento elástico e outra de comportamento plástico; (iv) viscoelástico e viscoplástico, quando a resposta do material depende do tempo (velocidade), etc.

Para definir completamente o modelo constitutivo dos materiais é ainda necessário, além da definição das relações matemáticas de comportamento, determinar parâmetros e propriedades

²Do inglês *Computer Aided Design*.

físicas e mecânicas dos materiais como, por exemplo, o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade do material.

Depois de determinadas e definidas as propriedades necessárias, são aplicados os carregamentos e definidas as condições de apoio e de contorno do problema — as condições de fronteira. Só depois se procede à fase de análise e cálculo.

De uma forma resumida, as etapas necessárias à resolução de um problema recorrendo ao método dos elementos finitos são: (i) a divisão do meio em elementos finitos com a ajuda de programas de pré-processamento; (ii) a definição das propriedades de cada elemento; (iii) a reunião dos elementos para a obtenção de um modelo de elementos finitos do meio a estudar; (iv) a aplicação dos carregamentos; (v) a definição dos modelos de comportamento da estrutura; (vi) a resolução simultânea das equações algébricas e lineares que definem o problema e (vii) o cálculo das tensões, deformações, *etc.* recorrendo a programas de pós-processamento.

Devido ao carácter numérico do método dos elementos finitos — é um método aproximado, — existe sempre algum grau de acumulação de erros aquando da execução do programa, podendo ser devidos à omissão ou má interpretação de aspectos importantes do comportamento físico do material, a erros na própria fase de programação, à utilização de programas inapropriados e/ou de dados incorrectos, a problemas associados à geração da malha, à utilização de elementos finitos inadequados, *etc.*

3.3 Programa de simulação numérica

Abaqus é uma palavra que deriva da palavra grega *aba-kala-culus*, que significa a memória de solução. O Abaqus é um pacote de *software* comercial de análise pelo método dos elementos finitos desenvolvido pela SIMULIA, uma marca da *Dassault Systemes SA*. O programa Abaqus é constituído por dois módulos gráficos: o módulo de pré-processamento CAE³ e o módulo de pós-processamentos, e por dois módulos principais de análise: o Abaqus/Standard e o Abaqus/Explicit.

É no módulo de pré-processamento (Abaqus/CAE) que o utilizador tem a possibilidade de conseguir uma rápida e eficiente definição da geometria do problema, atribuição das propriedades dos diferentes materiais, aplicação dos carregamentos e das condições de fronteira do problema, selecção do número de etapas pretendidas na análise e geração da malha de elementos finitos correspondente à estrutura em análise.

O Abaqus/CAE é composto por várias partições que permitem definir a geometria do modelo, atribuir materiais ao modelo e definir as suas propriedades mecânicas, agrupar as várias partes do modelo, impor a sequência de passos de análise e a sua natureza — linear ou não-linear —, definir interacções/atrito, atribuir condições de fronteira e carregamentos, gerar a da malha de elementos finitos e construir o ficheiro de entrada. Este ficheiro contém os vários dados do problema e, por ser um ficheiro ASCII, pode ser manipulado directamente pelo utilizador para situações não convenientemente tratadas pelo Abaqus/CAE.

A simulação computacional pelo método de elementos finitos pode ser executada pelos módulos Abaqus/Standard ou Abaqus/Explicit. Abaqus/Standard é uma solução de uso geral que recorre a um esquema de integração implícito tradicional, para a resolução de análises de elementos finitos. Abaqus/Explicit usa um esquema de integração explícita para resolver análises não-lineares dinâmicas e *quasi*-estáticas.

O Abaqus/Viewer opera sobre os ficheiros de saída, possibilitando assim a interpretação dos resultados numéricos, visualização gráfica e a realização de animação.

Inicialmente, o programa de simulação Abaqus foi concebido para abordar comportamentos físicos não-lineares. Consequentemente, tem um vasto leque de modelos de comportamento de materiais.

³Do inglês: *Computer Aided Engineering*.

Graças às diversas potencialidades do Abaqus, este permite que problemas de engenharia complexos, envolvendo geometrias complicadas, ocorrência de grandes deformações, interações entre materiais, etc. possam ser modeladas numericamente.

O Abaqus é um *software* amplamente utilizado no sector automóvel, aeroespacial, industrial e várias áreas de engenharia. É também muito utilizado em instituições académicas e de investigação e desenvolvimento tecnológico (I&DT) devido à grande capacidade de modelação material, bem como à sua grande versatilidade.

3.4 Modelo de dano de Johnson-Cook

Para simular a ocorrência de dano durante o processo de impacto balístico recorreu-se ao modelo plástico de dano de Johnson-Cook. Este modelo é um caso particular do modelo de plasticidade de von Mises com uma forma analítica da lei de encruamento e dependência da velocidade de deformação. É apropriado para velocidades de deformação elevadas e muitos modelos de comportamento de materiais, incluindo os metais. O modelo de Johnson-Cook é tipicamente utilizado em simulações de problemas adiabáticos, transientes e dinâmicos e pode ser utilizado em conjunto com o modelo de dano dinâmico de Johnson-Cook ou com o modelo progressivo de ruptura e dano, de forma a especificar diferentes critérios de iniciação de dano e modelos de evolução do dano que permitem a degradação progressiva da rigidez do material e remoção de elementos da malha de elementos finitos. Este modelo deve ser usado em conjunto com o modelo de material linear elástico da equação do modelo do estado do material.

A superfície limite de elasticidade de von Mises, com lei de escoamento associada, é utilizada no modelo plástico de Johnson-Cook. O modelo de encruamento de Johnson-Cook é um caso particular de encruamento isotrópico onde a tensão limite de elasticidade estática, σ_0 , é dada pela relação

$$\sigma^0 = \left[A + B \left(\bar{\varepsilon}^{pl} \right)^n \right] \left(1 - \hat{\theta}^m \right), \quad (3.1)$$

onde $\bar{\varepsilon}^{pl}$ é a deformação plástica equivalente e A , B , n e m são parâmetros do material relativos a temperaturas inferiores à temperatura de transição, θ_{tr} . $\hat{\theta}$ é a temperatura não-dimensional definida pela condição

$$\hat{\theta} \equiv \begin{cases} 0 & \text{se } \theta < \theta_{tr} \\ \frac{\theta - \theta_{tr}}{\theta_f - \theta_{tr}} & \text{se } \theta_{tr} \leq \theta \leq \theta_f \\ 1 & \text{se } \theta > \theta_f \end{cases} \quad (3.2)$$

Na relação anterior θ é a temperatura corrente, θ_f é a temperatura de fusão e θ_{tr} é a temperatura de transição, ou seja, a temperatura abaixo da qual não existe dependência na expressão da tensão limite de elasticidade. A temperatura do material deve ser medida abaixo da temperatura de transição.

Quando $\theta \geq \theta_f$, o material funde e assume um comportamento equivalente a um fluido, não exibindo nenhuma resistência ao corte, desde que $\sigma_0 = 0$. A memória de encruamento é removida ao definir a deformação plástica equivalente nula.

3.4.1 Dependência da velocidade de deformação

A dependência da velocidade de deformação, de acordo com o modelo de Johnson-Cook, pode ser expressa pela relação

$$\bar{\sigma} = \sigma_0 \left(\bar{\varepsilon}^{pl}, \theta \right) R \left(\dot{\bar{\varepsilon}}^{pl} \right), \quad (3.3)$$

em que

$$\dot{\bar{\epsilon}}^{pl} = \dot{\epsilon}_0 \exp \left[\frac{1}{C} (R - 1) \right] \quad \text{se } \bar{\sigma} \geq \sigma_0. \quad (3.4)$$

Nas expressões anteriores $\bar{\sigma}$ é a taxa de tensão de cedência não-nula, $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}$ é a velocidade de deformação plástica equivalente, $\dot{\epsilon}_0$ e C são parâmetros do material medidos abaixo da temperatura de transição θ_{tr} , $\sigma_0(\bar{\epsilon}^{pl}, \theta)$ é a tensão de cedência em regime estático, $R(\dot{\bar{\epsilon}}^{pl})$ é o quociente entre a tensão limite de elasticidade, para velocidade de deformação não-nula, e a tensão de cedência em regime estático, para que $R(\dot{\epsilon}_0) = 1,0$. Consequentemente, a tensão de cedência pode ser expressa pela relação

$$\bar{\sigma} = \left[A + B \left(\bar{\epsilon}^{pl} \right)^n \right] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left(1 - \hat{\theta}^m \right). \quad (3.5)$$

Para determinar a dependência da velocidade de deformação de Johnson-Cook é necessário definir valores de C e $\dot{\epsilon}_0$. A utilização do modelo encruamento de Johnson-Cook não requer, necessariamente, o uso da velocidade de deformação correspondente. Porém, o uso da velocidade de deformação de Johnson-Cook requer o uso do respectivo modelo encruamento.

3.4.2 Modelo de dano dinâmico

O Abaqus/Explicit disponibiliza um modelo de dano dinâmico de Johnson-Cook, para ser acoplado especificamente ao modelo de plasticidade de Johnson-Cook. Este é apropriado apenas para velocidades de deformação elevadas e materiais metálicos. O Abaqus também disponibiliza uma implementação mais genérica do modelo de dano como parte do critério de iniciação de dano, que é recomendado para modelação de dano progressivo. O modelo de dano dinâmico de Johnson-Cook é baseado na deformação plástica equivalente nos pontos de integração do elemento. Assume-se que ocorre ruptura quando o parâmetro de dano, ω , se torna superior a 1. O parâmetro de dano é definido por

$$\omega = \sum \left(\frac{\Delta \bar{\epsilon}^{pl}}{\bar{\epsilon}_f^{pl}} \right) \quad (3.6)$$

onde $\Delta \bar{\epsilon}^{pl}$ é o incremento da deformação plástica equivalente e $\bar{\epsilon}_f^{pl}$ é a deformação na ruptura. O somatório da equação 3.6 é feito sobre todos os incrementos da análise.

Assume-se que a deformação na ruptura, $\bar{\epsilon}_f^{pl}$, é dependente da velocidade de deformação adimensional, $\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}/\dot{\epsilon}_0$, a velocidade de tensão desviadora adimensional, p/q (onde p é a tensão hidrostática e q a tensão equivalente de von Mises) e a temperatura adimensional, $\hat{\theta}$, definida anteriormente no modelo de encruamento. As dependências são assumidas como separáveis e assumem a forma

$$\bar{\epsilon}_f^{pl} = \left[d_1 + d_2 \exp \left(d_3 \frac{p}{q} \right) \right] \left[1 + d_4 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}^{pl}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right] \left(1 + d_5 \hat{\theta} \right) \quad (3.7)$$

quando d_1 a d_5 são parâmetros de ruptura medidos abaixo da temperatura de transição, θ_{tr} e $\dot{\epsilon}_0$ é a velocidade de deformação de referência.

Quando este critério de ruptura é conhecido, as componentes desviadoras da tensão são iguais a zero e mantidas constantes até ao final da análise. Dependendo da escolha, a tensão hidrostática pode também ser anulada durante o cálculo. Se for este o caso, deve especificar-se o elemento a eliminar. Alternativamente, pode manter-se a compressibilidade até ao final do cálculo. Se for este o caso, deve optar-se por não eliminar o elemento. Por defeito, os elementos do critério de ruptura são eliminados.

A utilização do modelo de dano dinâmico de Johnson-Cook é validada pela velocidade de deformação elevada dos materiais. Assim, este modelo é mais aplicável a situações verdadeiramente dinâmicas em problemas *quasi*-estáticos que requerem a eliminação de elementos.

A deformação plástica equivalente tem bastante relevância para o modelo plástico de Johnson-Cook, e pode calcular-se da seguinte forma:

$$\bar{\epsilon}^{pl} = \bar{\epsilon}^{pl} \Big|_0 + \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\epsilon}^{pl} : \dot{\epsilon}^{pl}} dt \quad (3.8)$$

onde $\bar{\epsilon}^{pl} \Big|_0$ é a deformação plástica inicial que pode ser nula ou especificada pelo utilizador.

Capítulo 4

Simulações Numéricas

Descrevem-se os ensaios realizados sobre os alvos de Alumínio e Magnésio para espessuras compreendidas entre 10 e 20 mm com projétil rígido, deformável e com o modelo de dano de Johnson-Cook. Neste capítulo caracterizam-se também os materiais utilizados nos ensaios.

4.1 Descrição dos ensaios realizados

De forma a testar e validar as diferentes propriedades e modelos implementados no âmbito deste trabalho, quer relativamente ao alvo quer em relação ao projétil, foram efectuados diversos ensaios de simulação numérica. Estuda-se e compara-se o efeito, na *performance* balística dos alvos, de características e propriedades como, por exemplo, o material utilizado, a espessura do alvo, a rigidez e resistência da ameaça (projétil), etc.

Os alvos utilizados têm toda a geometria circular. Consequentemente, e por uma questão de simetria, em todos os ensaios de simulação numérica realizados utilizou-se apenas um quarto do alvo. As simulações numéricas foram efectuadas considerando três espessuras distintas para os alvos, a saber, 10, 15 e 20 mm. Para cada alvo de espessura diferente foram realizadas simulações com dois materiais distintos: (i) a liga de Alumínio AA5083-H32 e (ii) a liga de Magnésio AZ31B-H24.

Na tabela 4.1 apresenta-se a lista de todos os ensaios realizados no decurso deste trabalho, incluindo um código que servirá de referência para cada ensaio durante este trabalho. Este código é definido do seguinte modo:

XNN-Y,

em que X é uma letra maiúscula que designa o material do alvo (A – Alumínio e M – Magnésio), NN é um número de dois algarismos que se referem à espessura do alvo em milímetros e Y é uma letra maiúscula que designa o tipo de projétil (R – rígido e D – deformável). A título de exemplo, o ensaio cuja referência é

A15-D

diz respeito a uma simulação numérica em que o alvo é de Alumínio, a espessura é $d = 15$ mm e em que se considera o projétil deformável.

As condições de fronteira impostas ao modelo geométrico do alvo são de simetria nas duas faces correspondentes aos planos de simetria geométrica. Adicionalmente, de forma a evitar a

Tabela 4.1: Resumo dos ensaios de simulação numérica realizados.

Ref ^a	Espessura do alvo [mm]	Alumínio AA5083-H32	Magnésio AZ31B-H24	Projétil rígido	Projétil deformável	Johnson Cook
A20-R	20	✓		✓		
M20-R	20		✓	✓		
A20-D	20	✓			✓	✓
M20-D	20		✓		✓	✓
A15-R	15	✓		✓		
M15-R	15		✓	✓		
A15-D	15	✓			✓	✓
M15-D	15		✓		✓	✓
A10-R	10	✓		✓		
M10-R	10		✓	✓		
A10-D	10	✓			✓	✓
M10-D	10		✓		✓	✓

indeterminação do problema e impedir movimento de corpo rígido, impuseram-se condições de fixação (encastramento) na aresta circular da face oposta à frente do alvo.

Ao projétil foi atribuída uma velocidade inicial $v_0 = 408 \text{ ms}^{-1}$, restringindo o seu movimento à direcção axial do alvo, de forma a garantir um impacto ortogonal. A massa considerada para o projétil é $m = 1,85 \text{ g}$, correspondente a um quarto da massa total de um de uma munição $9 \times 19 \text{ mm}^1$.

Nos ensaios de simulação em que o projétil é considerado um corpo rígido, quer a massa quer a velocidade são atribuídas a um único ponto de referência na parte posterior do projétil.

Para a realização do segundo e terceiro grupo de ensaios, em que o projétil se considera deformável, consideraram-se projéteis maciços e totalmente construídos em Cobre. Deste modo, foram utilizados os valores de parâmetros mecânicos e de comportamento elástico e plástico, assim como a sua densidade. As condições de fronteira de simetria são em tudo idênticas às consideradas para os ensaios com projétil rígido. A velocidade inicial de impacto também é $v_0 = 408 \text{ ms}^{-1}$. Porém, quando se considera o projétil deformável, a velocidade é imposta em todo o projétil, e não somente a um ponto de referência. No que diz respeito às restrições de movimento, estas foram impostas num ponto na extremidade do projétil, de modo a permitir que este se deforme livremente.

A malha de elementos finitos pode ter várias formas, isto é, os elementos podem ser quadriláteros ou triângulos (no caso da geometria ser bidimensional) ou, no caso do ensaio ser a três dimensões, hexaédricos, tetraédricos ou pentaédricos. Nos ensaios realizados, foram usados elementos diferentes, sendo que para os alvos foram sempre utilizados elementos do tipo C3D8R (elemento tridimensional constituído por oito nós e com integração reduzida), enquanto que para o projétil foi usado o elemento R3D3 (elemento rígido triangular de três nós) no caso do projétil rígido e C3D4 (elemento tridimensional tetraédrico com quatro nós) para o projétil deformável. A representação esquemática da malha utilizada nos ensaios pode ser observada na figura 4.1. A diferença entre os elementos aplicados ao projétil não é visível uma vez que quer os elementos R3D3 quer os elementos C3D4 são representados por triângulos. Na tabela 4.2 indica-se o número de elementos e nós de cada ensaio.

Depois de gerar a malha, é calculado o deslocamento de um número finito de pontos no

¹Massa do projétil $M = 7,4 \text{ g} \approx 124 \text{ grains}$, sendo $100 \text{ grains} \approx 6 \text{ g}$. A massa m diz respeito, exclusivamente, ao projétil, uma vez que a massa total da munição é de aproximadamente de 12 g .

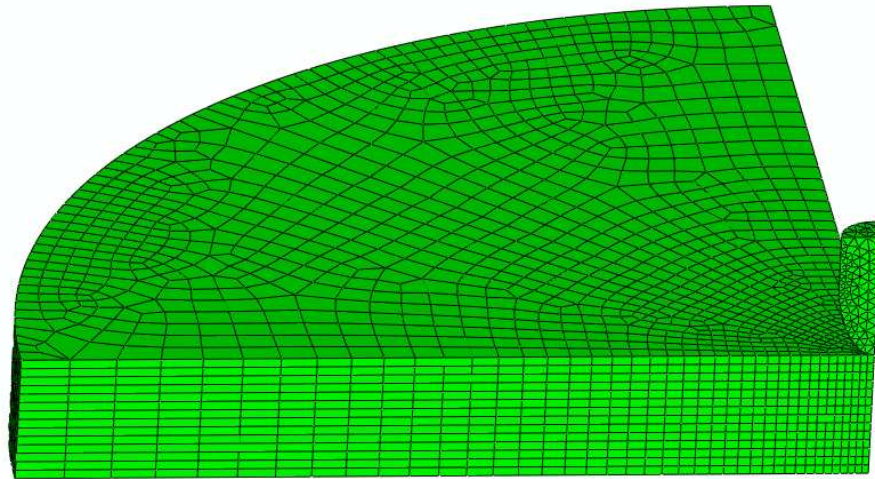


Figura 4.1: Representação genérica do tipo de malha de elementos finitos utilizada nos ensaios numéricos.

sistema — os nós da malha de elementos finitos. Em função dos deslocamentos dos nós da malha calculam-se os deslocamentos em qualquer ponto do elemento. Depois de calculados os deslocamentos nodais, determinam-se as deformações e o estado de tensão correspondentes.

4.2 Caracterização dos materiais

Na tabela 4.3 apresenta-se a composição química detalhada das ligas metálicas leves estudadas no âmbito deste trabalho. Nas secções seguintes descrevem-se os modelos de comportamento dos materiais utilizados quer nos alvos quer no projectil, quando considerado deformável.

Neste trabalho considera-se que todos os materiais seguem um modelo de comportamento que pode ser definido pela relação genérica

$$\sigma = k\varepsilon^n. \quad (4.1)$$

Nos pontos seguintes apresentam-se as equações para cada tipo de material usado nos ensaios. Para tal foi necessário determinar as propriedades mecânicas de cada material, isto é, das ligas de Alumínio AA5083-H32 e de Magnésio AZ31B-H24, referidas na tabela 2.1.

4.2.1 Modelo de comportamento do Alumínio

Para a liga de Alumínio AA5083-H32 os parâmetros da equação 4.1 são $k = 379,435$ e $n = 0,074$, de onde resulta

$$\sigma = 379,435\varepsilon^{0,074}. \quad (4.2)$$

Esta liga de Alumínio de aplicação especial tem muito boa resistência à corrosão, sensibilidade à deterioração após exposição prolongada a temperaturas elevadas e moderada resistência. A sua soldabilidade é uma vantagem adicional. Esta liga leve pode ser aplicada em sistemas de transporte, reservatórios sob pressão (RSP), aplicações de criogenia, torres e equipamento de perfuração, tubagens de gás e/ou petróleo, munições e chapas de armaduras para balística.

Tabela 4.2: Caracterização das malhas de elementos finitos.

Referência	Elementos	Nós
A20-R	15661	17661
M20-R	18059	20210
A20-D	16631	17834
M20-D	18737	20313
A20-D(JC)	16631	17834
M20-D(JC)	18943	20368
A15-R	15959	17981
M15-R	15977	17983
A15-D	17010	18168
M15-D	16895	18141
A15-D(JC)	18963	20386
M15-D(JC)	16895	18141
A10-R	13589	15440
M10-R	13593	15442
A10-D	14467	15591
M10-D	14561	15610
A10-D(JC)	14467	15591
M10-D(JC)	14561	15610

Tabela 4.3: Composição química das ligas de Alumínio AA5083-H32 e Magnésio AZ31B-H24.

Constituintes	Alumínio AA5083-H32	Magnésio AZ31B-H24
	[%]	[%]
Alumínio, Al	92,4 – 95,6	2,50 – 3,50
Cálcio, Ca	—	≤ 0,0400
Crômio, Cr	0,0500 – 0,250	—
Cobre, Cu	≤ 0,100	≤ 0,0500
Ferro, Fe	≤ 0,400	≤ 0,00500
Magnésio, Mg	4,00 – 4,90	97,0
Manganese, Mn	0,400 – 1,00	0,200
Níquel, Ni	—	≤ 0,00500
Silício, Si	≤ 0,400	≤ 0,100
Titânio, Ti	≤ 0,150	—
Zinco, Zn	≤ 0,250	0,600 – 1,40
Outros, total	≤ 0,150	—

4.2.2 Modelo de comportamento do Magnésio

Para a liga de Magnésio AZ31B-H24, os parâmetros da equação 4.1 são $k = 338,529$ e $n = 0,081$, resultando na relação constitutiva

$$\sigma = 338,529\epsilon^{0,081}. \quad (4.3)$$

4.2.3 Modelo de comportamento do Cobre

O material usado para o projectil, quando considerado deformável, foi o Cobre, sendo que as suas propriedades estão indicadas na tabela 4.4. Assim sendo, para o cobre (puro) os valores para a equação 4.1 foram: $k = 237,704$ e $n = 0,243$, ficando:

$$\sigma = 237,704\epsilon^{0,243}. \quad (4.4)$$

Tabela 4.4: Propriedades físicas e mecânicas do Cobre utilizado para caracterizar o projectil.

Propriedade	Valor
Densidade	8,96 g/cm ³
Tensão de cedência	33,3 MPa
Tensão de ruptura	210 MPa
Deformação	60,0%
Módulo de Young	110 GPa
Coefficiente de Poisson	0,343
Dureza	50,0 HV

Em geral, as ligas de Cobre apresentam boa ou mesmo excelente resistência à corrosão, alta condutividade térmica e condutividade elétrica muito elevada. As suas aplicações são variadas, desde o uso arquitectónico, a cunhagem, a aplicação em condensadores e/ou permutadores de calor, em canalizações e tubagens, nos núcleos de radiadores, em instrumentos musicais, fechaduras, fechos, dobradiças, em componentes de munições e em conectores elétricos. Pequenas quantidades de elementos de liga são muitas vezes adicionados ao Cobre para melhorar certas propriedades mecânicas e características físicas do Cobre. Neste sentido é possível aumentar ou reduzir a força, dureza, condutividade térmica e eléctrica, resistência à corrosão, ou mesmo alterar a cor. Elementos primários comuns incluem liga de estanho (o bronze) ou zinco (o latão).

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Procede-se à análise e comparação dos resultados numéricos obtidos nas simulações numéricas recorrendo ao *software* de simulação pelo método dos elementos finitos Abaqus.

5.1 Introdução

Nas secções que se seguem apresentam-se e discutem-se os resultados numéricos obtidos, começando pelas análises por elementos finitos em que se considera que a ameaça — o projectil de calibre 9×19 mm — é rígido, apesar de ter a geometria correcta, seguido por ensaios considerando o projectil deformável e também recorrendo ao modelo de dano de Johnson-Cook.

Todos os resultados que se apresentam neste capítulo são recolhidos a partir de uma linha radial imaginária na face do alvo sujeita ao impacto do projectil. Para facilitar a visualização de resultados apresentam-se, também, figuras de isovalores, obtidas em qualquer um dos planos de simetria do alvo.

Na figura 5.1 pode ver-se uma representação esquemática do alvo e projectil usados nos ensaios, onde $v_0 = 408 \text{ ms}^{-1}$ representa a velocidade do projectil, correspondente a uma energia de 0,616 kJ, $r = 100$ mm é o raio do alvo e d a espessura, compreendida entre 10 e 20 mm.

5.2 Alvo deformável e projectil rígido

Nos parágrafos seguintes são apresentados os resultados, na forma de curvas de tensão e de deformação e dos campos de isovalores respectivos, para os alvos de Alumínio AA5083-H32 e Magnésio AZ31B-H24. Como foi referido anteriormente, consideram-se alvos com espessuras compreendidas entre 10 e 20 mm. O projectil de calibre 9 mm considera-se, em todas as análises desta secção, rígido.

No gráfico da figura 5.2 está representada a evolução quer da tensão equivalente quer da deformação plástica equivalente com a distância radial, desde o centro do alvo. Estes resultados dizem respeito aos alvos quer de Alumínio quer de Magnésio com 20 mm de espessura. Como se pode verificar pelos resultados apresentados na figura 5.2, a tensão máxima na face de impacto do alvo de Alumínio AA5083-H32 é $\sigma_{VM}^{max} = 267$ MPa, associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,437$. Por outro lado, para o alvo de Magnésio AZ31B-H34, o valor máximo de tensão é $\sigma_{VM}^{max} = 257,6$ MPa, associada a uma deformação máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,206$. Assim, como se pode verificar por estes resultados, os níveis de tensão não variam muito com o material

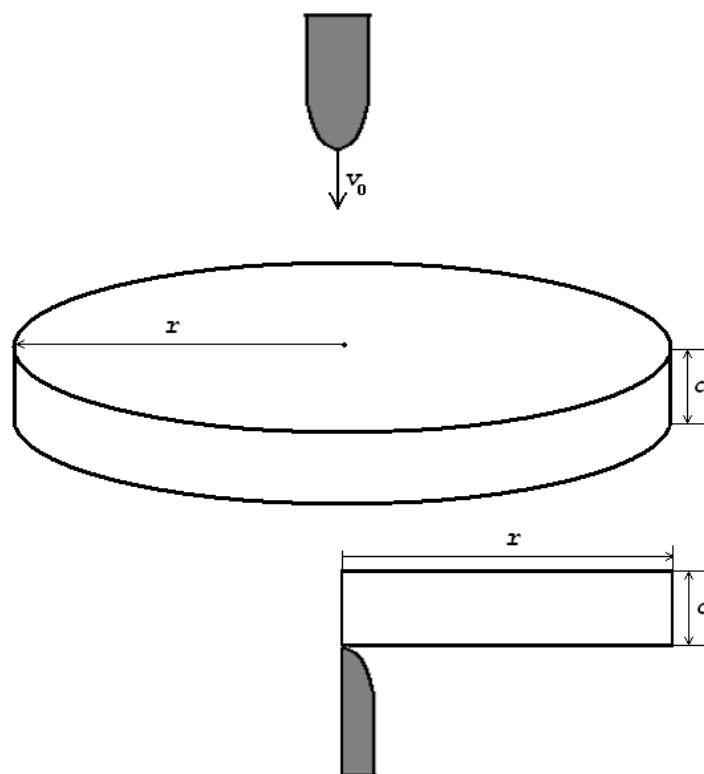


Figura 5.1: Representação esquemática do ensaio com alvo e projectil completo (em cima). Representação esquemática de um quarto do alvo para análise numérica (em baixo).

do alvo. Já os níveis de deformação plástica são significativamente diferentes, sendo a deformação no alvo de Magnésio cerca de 52% da deformação no alvo de Alumínio.

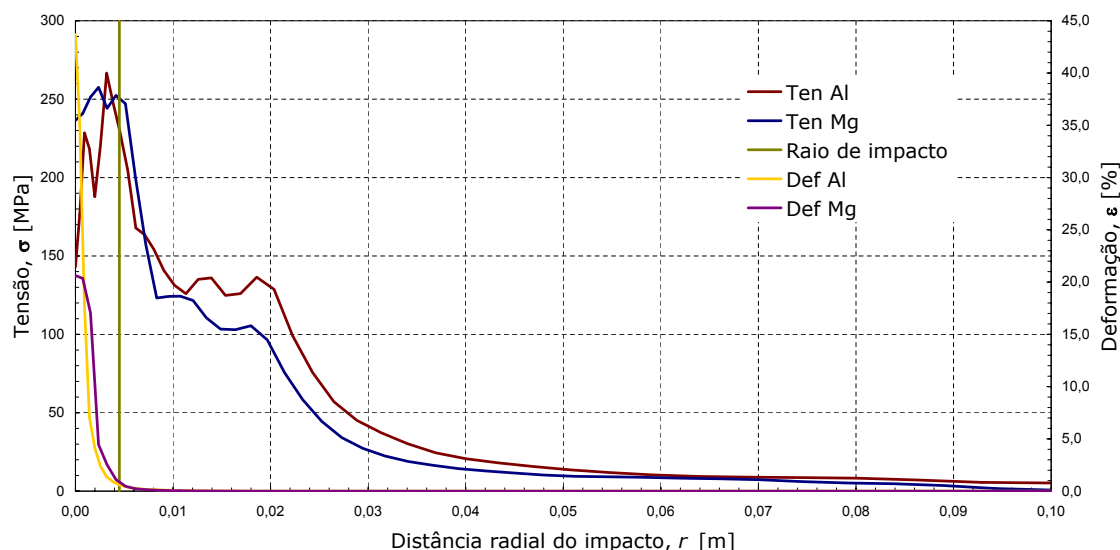


Figura 5.2: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^p$ para o alvo com espessura $d = 20$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projétil rígido.

Considerando os resultados de tensão de von Mises que se mostram na figura 5.3, para o alvo de Alumínio AA5083-H32, pode verificar-se que se chegam a atingir tensões da ordem de 320 MPa. Nestes resultados é ainda possível verificar que a tensão na aresta de encastramento do alvo atinge valores próximos de 55 MPa. Porém, o campo de tensões torna-se uniforme antes de atingir a zona do encastramento. Com esta constatação pode concluir-se que a dimensão radial escolhida para o alvo é correcta.

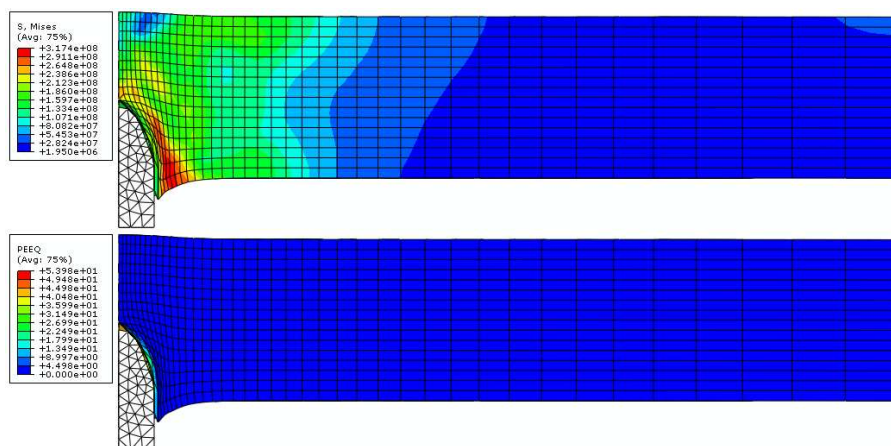


Figura 5.3: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 20$ mm e projétil rígido.

A ligeira disparidade evidente entre os resultados apresentados nas figuras 5.2 e 5.3 prende-se com o facto de a malha de elementos finitos do projétil, aqui considerado rígido, ser diferente nos dois planos de simetria do alvo. Este facto leva a que as distribuições de tensões e deformações nos planos de simetria exibam algumas diferenças. Os resultados da figura 5.2 são recolhidos numa

direcção a 45° com ambos os planos de simetria e na face de impacto.

Na figura 5.3, em baixo, apresenta-se a distribuição de deformação plástica equivalente no alvo de Alumínio AA5083-H32, que atinge valores da ordem de 54%

Na figura 5.4, referente às distribuições de tensões e de deformações no alvo de Magnésio AZ31B-H24 de espessura $d = 20$ mm, pode verificar-se que os valores máximos de tensão superam os 283 MPa com níveis de deformação plástica equivalente máxima de $\bar{\epsilon}^P = 0,240$. Porém, a distribuição de tensões é menos homogênea e chegam a atingir-se tensões de 95 MPa na aresta de encastramento do alvo, sem no entanto alterar significativamente a homogeneidade de distribuição de tensões no disco do alvo.

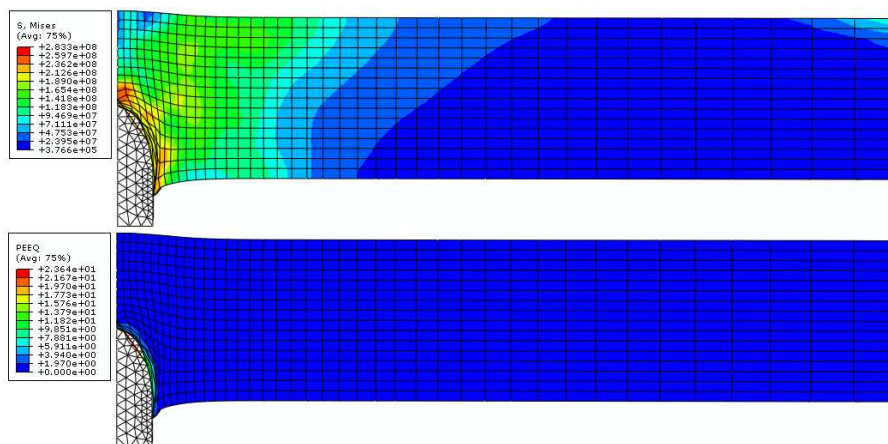


Figura 5.4: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 20$ mm e projectil rígido.

Comparando os resultados descritos nos parágrafos anteriores pode observar-se que no alvo de Alumínio AA5083-H32 se atingem níveis de tensão cerca de 11% mais elevados. No que diz respeito à deformação plástica equivalente, também o alvo de Magnésio AZ31B-H24 é o que exhibe melhor comportamento, com deformações cerca de 55% inferiores.

Observando a topologia e os níveis de tensão equivalente nos alvos com espessura $d = 20$ mm pode concluir-se que a dimensão considerada para o alvo — circular com raio $r = 100$ mm — e as condições de fronteira adoptadas — encastramento na aresta exterior da face oposta ao impacto — são ideais para as simulações realizadas no âmbito deste trabalho.

Observando os resultados apresentados no gráfico da figura 5.5, correspondentes ao alvo com espessura $d = 15$ mm, verifica-se que o valor máximo de tensão no alvo de Alumínio AA5083-H32 é $\sigma_{VM}^{max} = 257,1$ MPa, associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,289$. Por outro lado, para o alvo de Magnésio AZ31B-H34, o valor máximo de tensão é $\sigma_{VM}^{max} = 280$ MPa, associada a uma deformação máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,317$. Consequentemente, os níveis de tensão equivalente não variam muito com o material do alvo. Neste caso, também os níveis de deformação plástica são relativamente próximos, sendo a deformação no alvo de Magnésio cerca de 9% superior à deformação no alvo de Alumínio.

Relativamente aos resultados obtidos com o alvo de Alumínio, pode verificar-se que, de acordo com a distribuição de tensão equivalente que se apresenta na figura 5.6, a tensão máxima para este material é $\sigma_{VM}^{max} = 314$ MPa. Na aresta de encastramento verifica-se que, para o alvo de Alumínio AA5083-H32, se atinge uma tensão próxima de 107 MPa, sem alterar significativamente a homogeneidade de distribuição de tensões. O valor máximo de deformação plástica equivalente causada pelo impacto do projectil no alvo é $\bar{\epsilon}^P = 0,320$.

Analizando os resultados em termos de tensão de von Mises, que se mostram na figura 5.7, relativamente ao alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, pode verificar-se que a tensão máxima

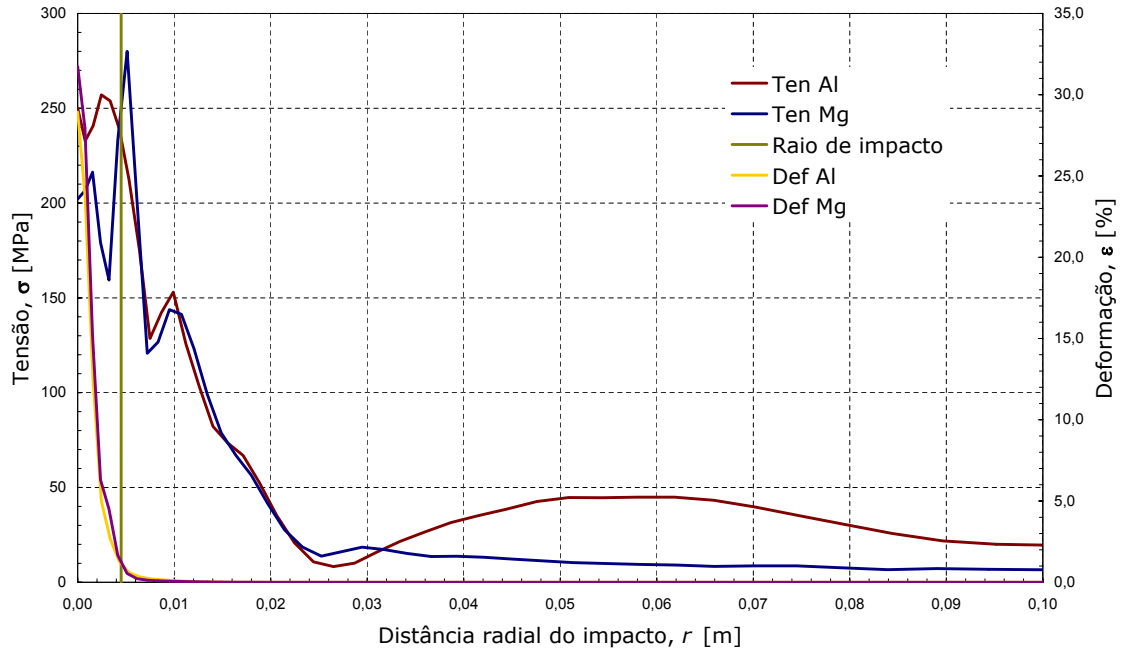


Figura 5.5: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^p$ para o alvo com espessura $d = 15$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil rígido.

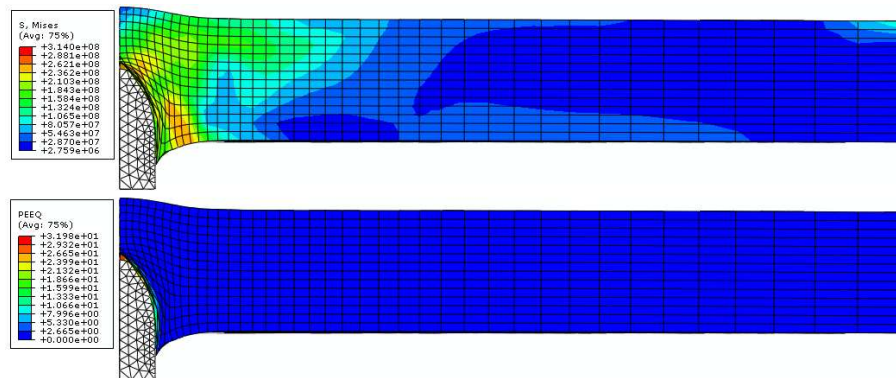


Figura 5.6: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 15$ mm e projectil rígido.

é $\sigma_{vM}^{max} = 289$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima quase nula ($\sigma_{vM}^{max} = 25,2$ MPa). No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Magnésio, representada na mesma figura 5.7, observa-se que $\bar{\epsilon}^P = 0,557$.

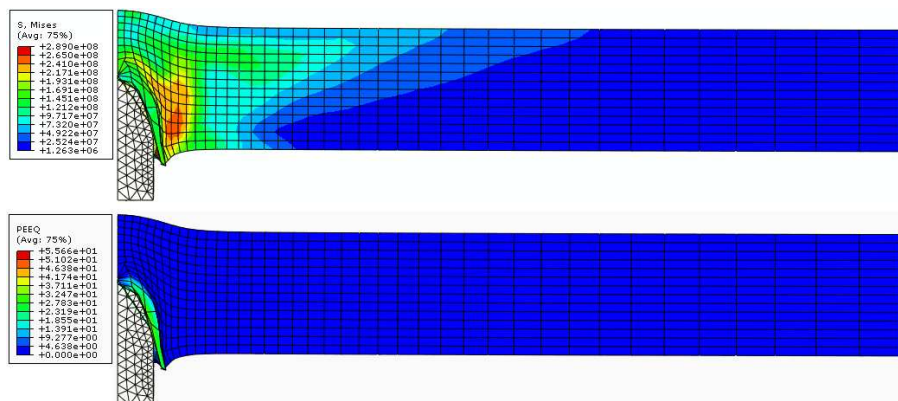


Figura 5.7: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 15$ mm e projectil rígido.

Comparando os resultados obtidos, quer para o alvo de liga de Alumínio AA5083-H32 quer para o alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, pode afirmar-se que no alvo de Alumínio se atingem tensões máximas cerca de 8% mais elevadas do que para o alvo de Magnésio. Contrariamente à tendência evidente para a tensão máxima, o alvo de Magnésio exibe uma maior capacidade de deformação do que o alvo de Alumínio, atingindo níveis de deformação plástica equivalente cerca de 43% superiores.

No gráfico da figura 5.8 mostra-se a evolução radial da tensão σ_{vM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para os alvos com espessura $d = 10$ mm (alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil rígido). No caso do alvo de Alumínio, na face do alvo que recebe o impacto da ameaça, o valor para a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{max} = 269,6$ MPa para uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,374$. Já no caso do alvo de Magnésio a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{max} = 223,8$ MPa associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,297$.

Analisando os resultados em termos de distribuição (isovalores) de tensão de von Mises, que se mostram na figura 5.9, relativamente ao alvo de liga de Alumínio, pode verificar-se que a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{max} = 273,3$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima $\sigma_{vM}^{max} \approx 70$ MPa. No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Alumínio observa-se que $\bar{\epsilon}^P = 0,412$.

Analisando os resultados em termos de distribuição (isovalores) de tensão de von Mises, que se mostram na figura 5.10, relativamente ao alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, observa-se que a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{max} = 269,6$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima $\sigma_{vM}^{max} \approx 70$ MPa. No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Magnésio observa-se que $\bar{\epsilon}^P = 0,304$.

Comparando os resultados obtidos, quer para o alvo de liga de Alumínio AA5083-H32 quer para o alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24 com espessura $d = 10$ mm, pode afirmar-se, mais uma vez, que no alvo de Alumínio se atingem tensões máximas ligeiramente mais elevadas do que para o alvo de Magnésio. A diferença é de cerca de 1,5%. A mesma tendência é evidente para a capacidade de deformação, cerca de 26% superior no alvo de liga de Alumínio.

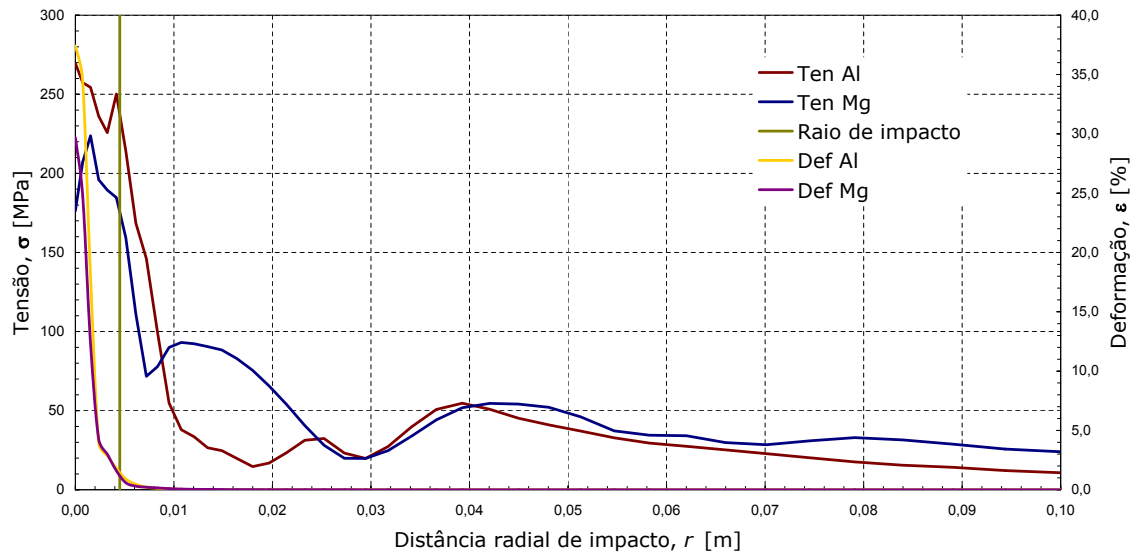


Figura 5.8: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^p$ para o alvo com espessura $d = 10$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil rígido.

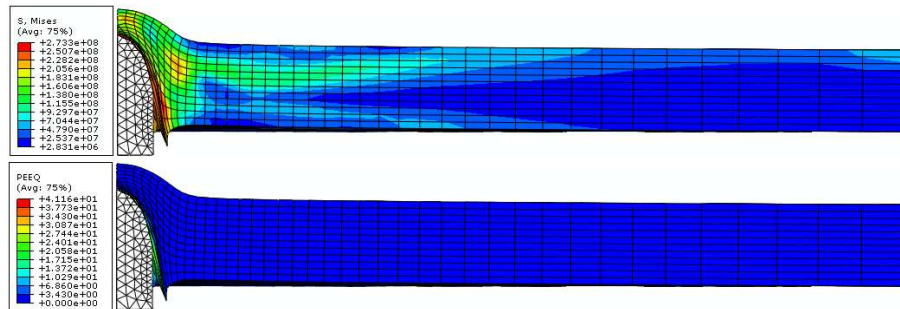


Figura 5.9: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 10$ mm e projectil rígido.

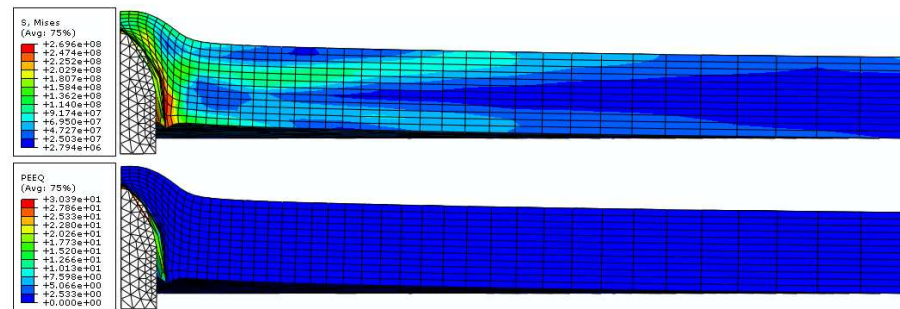


Figura 5.10: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 10$ mm e projectil rígido.

5.3 Alvo e projectil deformáveis

Nos parágrafos seguintes são apresentados os resultados, na forma de curvas de tensão e de deformação e dos campos de isovalores respectivos, para os alvos de Alumínio AA5083-H32 e Magnésio AZ31B-H24. Como foi referido anteriormente, consideram-se alvos com espessuras compreendidas entre 10 e 20 mm. O projectil de calibre 9 mm considera-se, em todas as análises desta secção, deformável. Esta é, portanto, uma abordagem mais próxima da realidade.

No gráfico da figura 5.11 está representada a evolução quer da tensão equivalente quer da deformação plástica equivalente com a distância radial, desde o centro do alvo. Estes resultados dizem respeito aos alvos quer de Alumínio quer de Magnésio com 20 mm de espessura. Como se pode verificar pelos resultados apresentados na figura 5.11, a tensão máxima na face de impacto do alvo de Alumínio AA5083-H32 é $\sigma_{VM}^{max} = 289,1$ MPa, associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,037$. Por outro lado, para o alvo de Magnésio AZ31B-H34, o valor máximo de tensão é $\sigma_{VM}^{max} = 214,7$ MPa, associada a uma deformação máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,091$. Assim, como se pode verificar por estes resultados, a tensão no alvo de Alumínio é cerca de 26% superior à tensão no alvo de Magnésio. Já os níveis de deformação plástica são significativamente diferentes, sendo a deformação no alvo de Magnésio cerca de 59% superior à deformação no alvo de Alumínio.

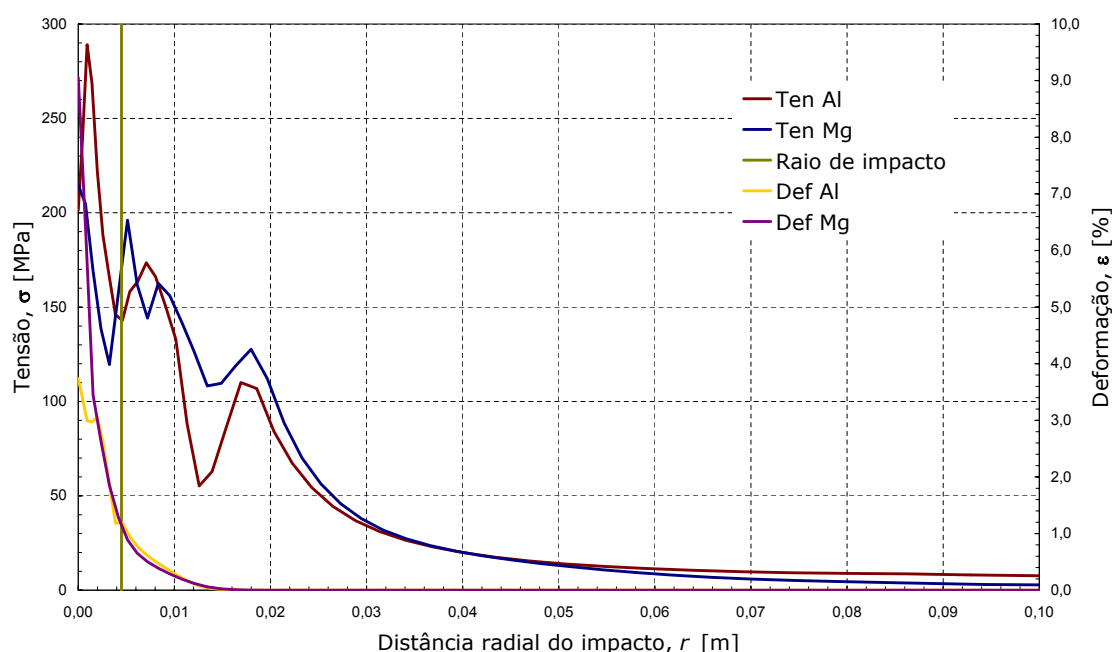


Figura 5.11: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 20$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável.

Considerando os resultados de tensão de von Mises que se mostram na figura 5.12, para o alvo de Alumínio AA5083-H32, pode verificar-se que se chegam a atingir tensões da ordem de 307,4 MPa. Nestes resultados é ainda possível verificar que a tensão na aresta de encastramento do alvo atinge valores próximos de 26,6 MPa. Porém, o campo de tensões torna-se uniforme antes de atingir a zona do encastramento. Com esta constatação pode concluir-se, mais uma vez, que a dimensão radial escolhida para o alvo é a indicada.

Na figura 5.12, em baixo, apresenta-se a distribuição de deformação plástica equivalente no alvo de Alumínio AA5083-H32, que atinge valores da ordem de 8%. Na figura 5.13, referente às

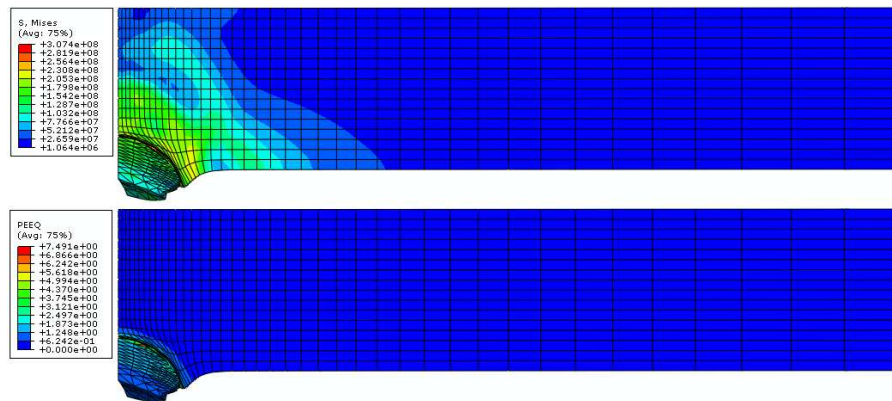


Figura 5.12: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 20$ mm e projectil deformável.

distribuições de tensões e de deformações no alvo de Magnésio AZ31B-H24 de espessura $d = 20$ mm, pode verificar-se que os valores máximos de tensão superam os 284,6 MPa com níveis de deformação plástica equivalente máxima de $\bar{\epsilon}^p = 0,091$. Porém, a distribuição de tensões é menos homogênea e chegam a atingir-se tensões de 24 MPa na aresta de encastramento do alvo, sem no entanto alterar significativamente a homogeneidade de distribuição de tensões no disco do alvo.

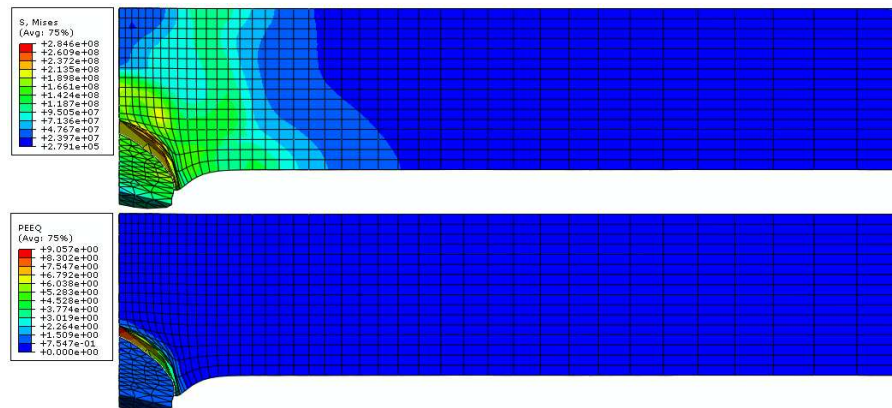


Figura 5.13: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 20$ mm e projectil deformável.

Comparando os resultados descritos nos parágrafos anteriores pode observar-se que no alvo de Alumínio AA5083-H32 se atingem níveis de tensão cerca de 7% mais elevados. No que diz respeito à deformação plástica equivalente, o alvo de Alumínio AA5083-H32 é o que exibe melhor comportamento, com deformações cerca de 18% inferiores.

No âmbito deste trabalho, ainda foi testado o grau de deformação do projectil e a distribuição de tensões quando este atinge o alvo. Os ensaios foram feitos para os dois tipos de alvo (a liga de Alumínio AA5083-H32 e de Magnésio AZ31B-H24) para as três espessuras diferentes utilizadas anteriormente (10, 15 e 20 mm).

Os resultados obtidos, que se apresentam nas figuras 5.14 e 5.15, são registados no perímetro de um quarto do projectil. Observando os resultados apresentados nestas figuras, relativos ao impacto do projectil no alvo de Alumínio (AA5083-H32) com 20 mm de espessura, pode verificar-se que para o ângulo de 105° se atingiu a tensão $\sigma_{VM}^{max} = 182$ MPa. Para 300° a tensão é $\sigma_{VM}^{min} = 61$ MPa. Quanto à deformação atingida pelo projectil para o mesmo material, observa-se que

para o ângulo de 105° se obtém $\bar{\varepsilon}_{\max}^p = 2,90\%$ e para 270° se obtém $\bar{\varepsilon}_{\min}^p = 0,70\%$.

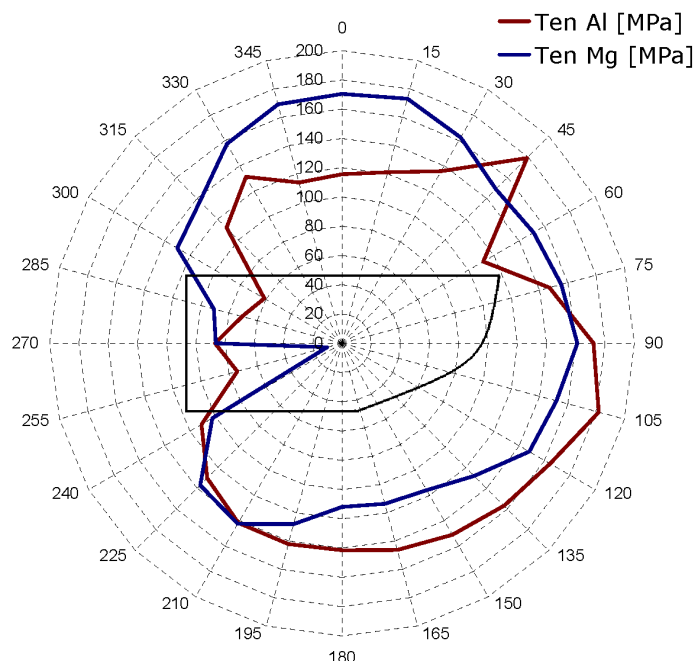


Figura 5.14: Distribuição polar da tensão do projectil deformável de Cobre ao atingir o alvo ($d = 20$ mm).

De acordo com os resultados relativos ao projectil e ao impacto com o alvo de Magnésio (liga AZ31B-H24), observa-se que aos 15° o valor máximo da tensão é $\sigma_{VM}^{\max} = 173$ MPa. O valor mínimo da tensão aparece para o ângulo 255° e toma o valor $\sigma_{VM}^{\min} = 11$ MPa. A deformação máxima que o projectil atinge é $\bar{\varepsilon}_{\max}^p = 1,38\%$ para um ângulo de 330° . A deformação mínima, $\bar{\varepsilon}_{\min}^p = 0,81\%$, corresponde a um ângulo de 255° .

Fazendo a comparação entre os resultados dos gráficos das figuras 5.14 e 5.15, relativos ao impacto do projectil para os dois tipos de alvo, pode dizer-se que o projectil quando atinge o alvo de Alumínio atinge tensões extremas (máxima e mínima) superiores, comparativamente com o alvo de Magnésio. O mesmo não se verifica no que diz respeito ao grau de deformação, uma vez que o projectil atinge uma deformação máxima superior para o alvo de Alumínio (AA5083-H32) em ângulos inferiores e valores superiores de deformação mínima no embate com o alvo de Magnésio (AZ31B-H24).

Observando os resultados apresentados no gráfico da figura 5.16, correspondentes ao alvo com espessura $d = 15$ mm, verifica-se que o valor máximo de tensão no alvo de Alumínio AA5083-H32 é $\sigma_{VM}^{\max} = 286,2$ MPa, associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\varepsilon}^p = 0,097$. Por outro lado, para o alvo de Magnésio AZ31B-H34, o valor máximo de tensão é $\sigma_{VM}^{\max} = 255,3$ MPa, associada a uma deformação máxima $\bar{\varepsilon}^p = 0,164$.

Consequentemente, os níveis de tensão equivalente variam cerca de 11% com o material do alvo. O mesmo não acontece nos níveis de deformação plástica, sendo a deformação no alvo de Magnésio cerca de 41% superior à deformação no alvo de Alumínio.

Relativamente aos resultados obtidos com o alvo de Alumínio, pode verificar-se que, de acordo com a distribuição de tensão equivalente que se apresenta na figura 5.17, a tensão máxima para este material é $\sigma_{VM}^{\max} = 318,5$ MPa. Na aresta de encastramento verifica-se que, para o alvo de Alumínio AA5083-H32, se atinge uma tensão próxima de 55,4 MPa. O valor máximo de deformação plástica equivalente causada pelo impacto do projectil no alvo é $\bar{\varepsilon}^p = 0,106$.

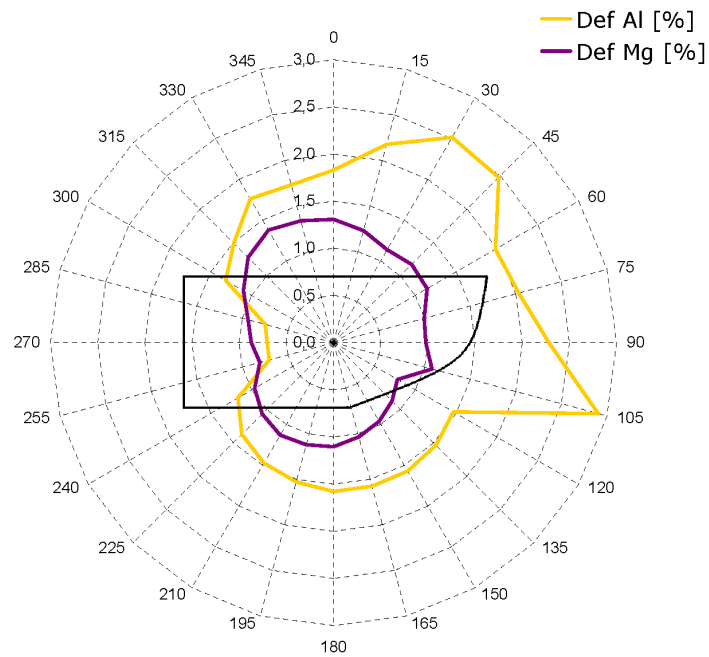


Figura 5.15: Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 20$ mm).

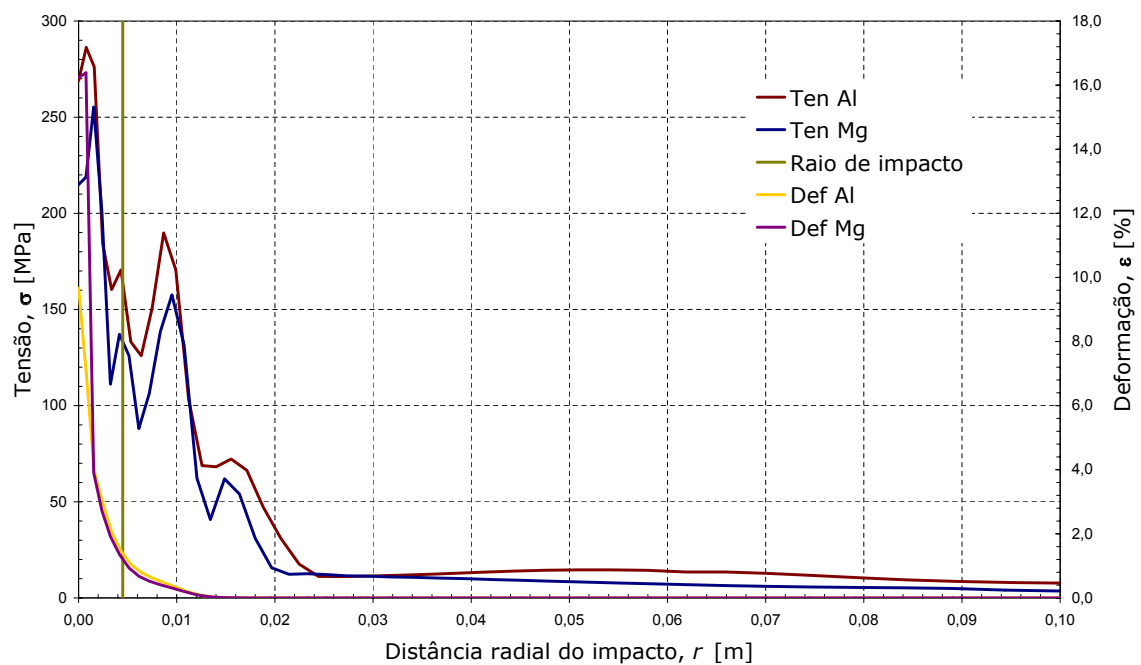


Figura 5.16: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação ϵ^P para o alvo com espessura $d = 15$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável.

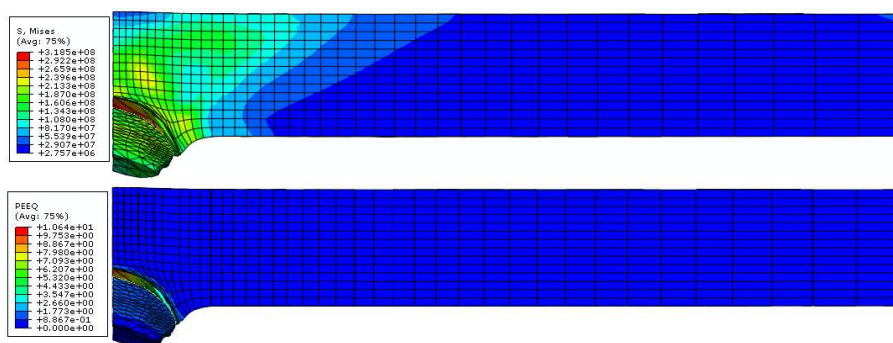


Figura 5.17: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 15$ mm e projectil rígido.

Analisando os resultados em termos de tensão equivalente de von Mises, que se mostram na figura 5.18, relativamente ao alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, pode verificar-se que a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{\max} = 257,8$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima aproximadamente nula ($\sigma_{vM}^{\max} = 22,2$ MPa). No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Magnésio, representada na mesma figura 5.18, observa-se que $\bar{\epsilon}^p = 0,164$.

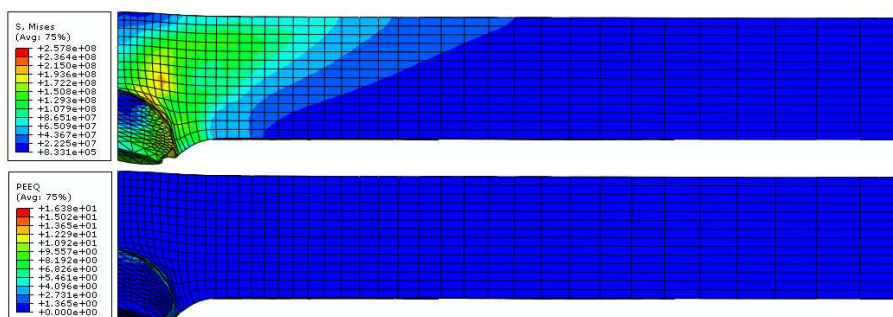


Figura 5.18: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 15$ mm e projectil deformável.

Comparando os resultados obtidos, quer para o alvo de liga de Alumínio AA5083-H32 quer para o alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, pode afirmar-se que no alvo de Alumínio se atingem tensões máximas cerca de 19% mais elevadas do que para o alvo de Magnésio. Contrariamente à tendência evidente para a tensão máxima, o alvo de Magnésio exibe uma maior capacidade de deformação do que o alvo de Alumínio, atingindo níveis de deformação plástica equivalente cerca de 35% superiores.

No impacto no alvo de Alumínio, de acordo com os resultados do gráfico da figuras 5.19, o projectil atinge uma tensão máxima $\sigma_{vM}^{\max} = 198$ MPa e mínima $\sigma_{vM}^{\min} = 121$ MPa, para ângulos de 135 e 150°, respectivamente.

Analisando os resultados do gráfico da figura 5.19, relativos à colisão do projectil com alvo de Magnésio, verifica-se que para um ângulo de 330°, o projectil atinge uma tensão equivalente máxima $\sigma_{vM}^{\max} = 192$ MPa. Para o ângulo de 120° regista-se a tensão mínima $\sigma_{vM}^{\min} = 12$ MPa.

Para o grau de deformação no alvo de Alumínio verifica-se, no gráfico da figura 5.20, que o projectil atinge $\bar{\epsilon}_{\max}^p = 1,86\%$ aos 105° de ângulo e $\bar{\epsilon}_{\min}^p = 0,68\%$ para um ângulo de 270°.

No alvo de Magnésio AZ31B-H24, o grau de deformação máxima do projectil é de 2,92% para um ângulo de 105° enquanto que a deformação mínima é 0,54% para 255°, como se pode verificar

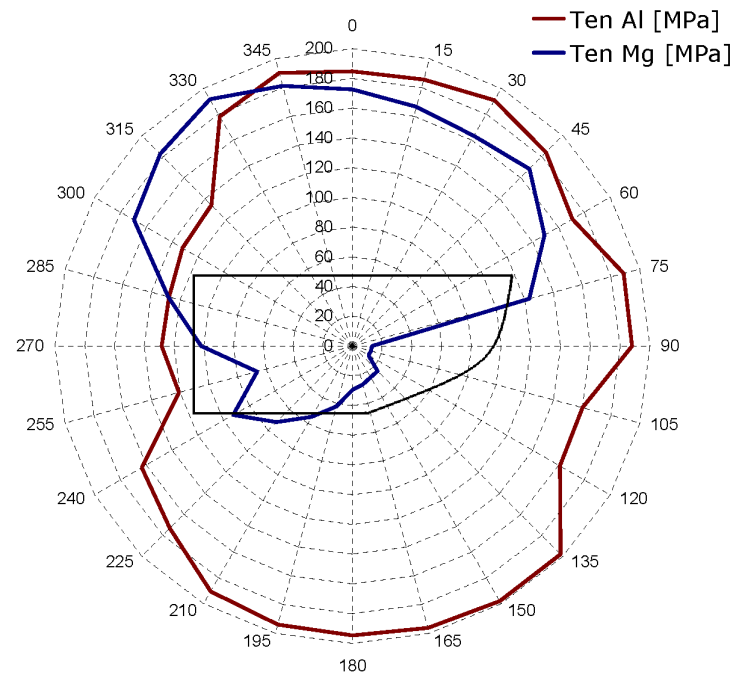


Figura 5.19: Distribuição polar da tensão do projectil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 15$ mm).

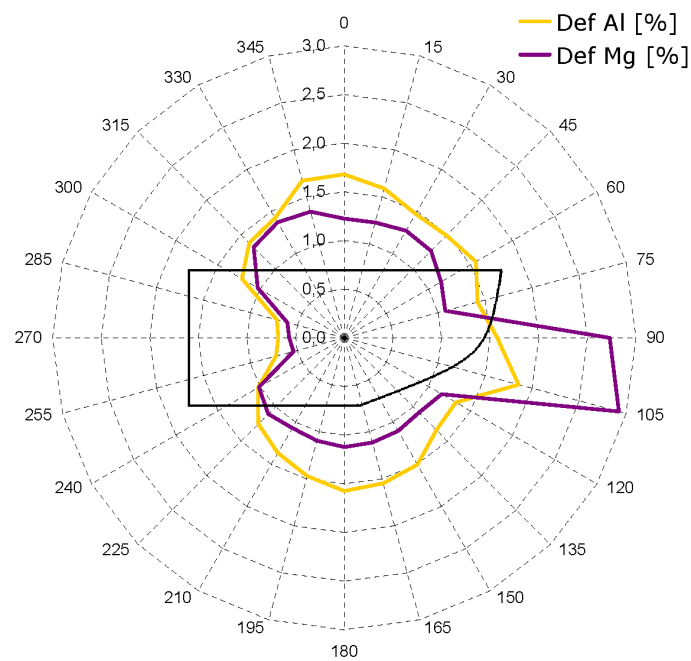


Figura 5.20: Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 15$ mm).

pelos resultados apresentados no gráfico da figura 5.20.

Comparando os resultados obtidos para o impacto do projectil para ambos os materiais do alvo (ligas de Alumínio AA5083-H32 e Magnésio AZ31B-H24), pode dizer-se que o projectil atinge uma tensão máxima superior no impacto com o alvo de Alumínio, para ângulos igualmente superiores, o mesmo acontecendo para tensões mínimas. Relativamente ao grau de deformação que o projectil sofre, observa-se uma maior deformação para o mesmo ângulo aquando do impacto com o alvo de Magnésio, verificando-se uma deformação mínima menor ao atingir o alvo de Magnésio.

No gráfico da figura 5.21 mostra-se a evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para os alvos com espessura $d = 10$ mm (alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável). No caso do alvo de Alumínio, na face do alvo que recebe o impacto da ameaça, o valor para a tensão máxima é $\sigma_{VM}^{max} = 266,5$ MPa para uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,034$. Já no caso do alvo de Magnésio a tensão máxima é $\sigma_{VM}^{max} = 209,1$ MPa associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,126$. Consequentemente, os níveis de tensão equivalente variam cerca de 22% com o material do alvo, sendo superiores no alvo de Alumínio. O mesmo não acontece nos níveis de deformação plástica, sendo a deformação no alvo de Magnésio cerca de 73% superior à deformação no alvo de Alumínio.

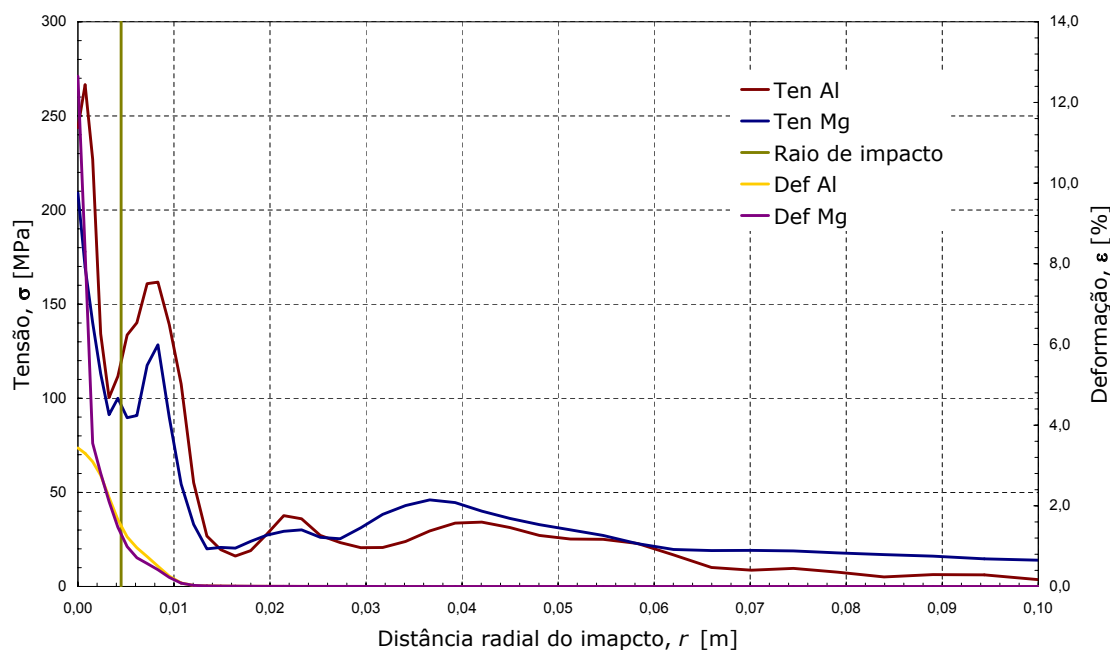


Figura 5.21: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 10$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável.

Analisando os resultados em termos de distribuição de tensão de von Mises, que se mostram na figura 5.22, relativamente ao alvo de liga de Alumínio, pode verificar-se que a tensão máxima é $\sigma_{VM}^{max} = 319,8$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima $\sigma_{VM}^{max} \approx 108$ MPa. No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Alumínio observa-se que $\bar{\epsilon}^P = 0,096$.

Analisando os resultados em termos de distribuição (isovalores) de tensão de von Mises, que se mostram na figura 5.23, relativamente ao alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, observa-se que a tensão máxima é $\sigma_{VM}^{max} = 290$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima $\sigma_{VM}^{max} \approx 50$ MPa. No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Magnésio observa-se que $\bar{\epsilon}^P = 0,137$.

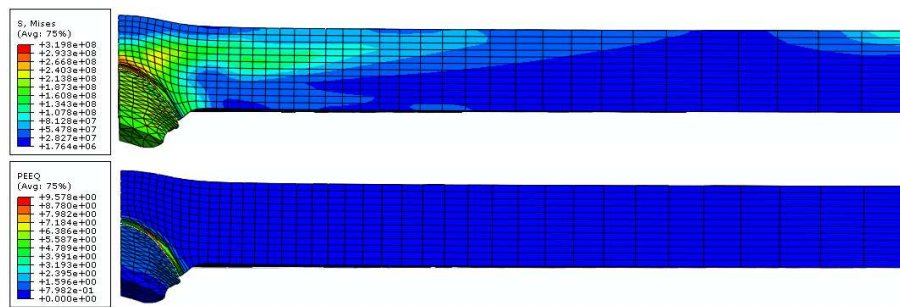


Figura 5.22: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 10$ mm e projectil deformável.

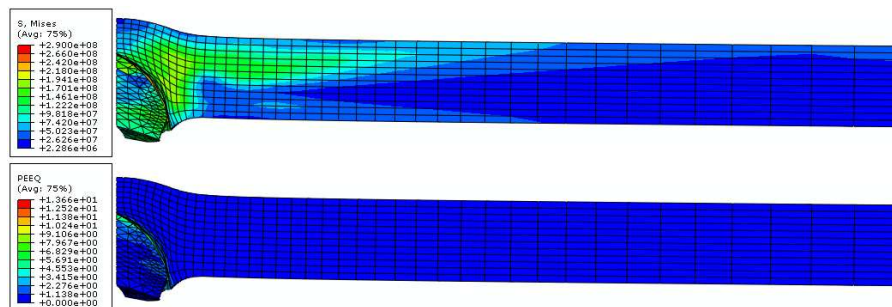


Figura 5.23: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 10$ mm e projectil deformável.

Comparando os resultados obtidos, quer para o alvo de liga de Alumínio AA5083-H32 quer para o alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24 com espessura $d = 10$ mm, pode afirmar-se, mais uma vez, que no alvo de Alumínio se atingem tensões máximas ligeiramente mais elevadas do que para o alvo de Magnésio. A diferença é de cerca de 9%. O mesmo não acontece para a capacidade de deformação, cerca de 30% superior no alvo de liga de Magnésio.

Observando os resultados do gráfico da figura 5.24, pode afirmar-se que a tensão máxima atingida pelo projectil quando embate no alvo de Alumínio é $\sigma_{vM}^{max} = 208$ MPa para um ângulo de 105° . Já a tensão mínima atingida é $\sigma_{vM}^{min} = 143$ MPa, para 60° . No que diz respeito aos resultados do projectil quando este atinge o alvo de Magnésio (vd. figura 5.24), pode dizer-se que a tensão máxima atingida pelo projectil é $\sigma_{vM}^{max} = 160$ MPa, para um ângulo de 345° e a tensão mínima é $\sigma_{vM}^{min} = 43$ MPa para 75° .

No que diz respeito à deformação do projectil aquando do impacto no alvo de Alumínio, segundo os resultados do gráfico da figura 5.25, verifica-se que para um ângulo de 105° se atinge a deformação máxima $\bar{\epsilon}_{max}^p = 2,44\%$ enquanto que a mínima $\bar{\epsilon}_{min}^p = 0,59\%$ foi atingida aos 255° .

Relativamente ao grau de deformação do projectil no alvo de Magnésio AZ31B-H24 (vd. figura 5.25), verifica-se que $\bar{\epsilon}_{max}^p = 4,90\%$ aos 105° e $\bar{\epsilon}_{min}^p = 0,52\%$ para um ângulo de 255° . Relacionando os resultados dos gráficos das figuras 5.24 e 5.25, observam-se tensões máximas superiores, atingidas pelo projectil aquando do impacto com o alvo de Alumínio AA5083-H32, num menor ângulo, comparando com o alvo de Magnésio AZ31B-H24.

Para o grau de deformação, curiosamente, obtiveram-se valores máximos para o mesmo ângulo em ambos os tipos de alvo de 10 mm de espessura e assim como nos valores mínimos, no entanto o projectil ao atingir o alvo de Magnésio sofre maior deformação, enquanto que no alvo de Alumínio se atinge um valor de deformação mínima superior.

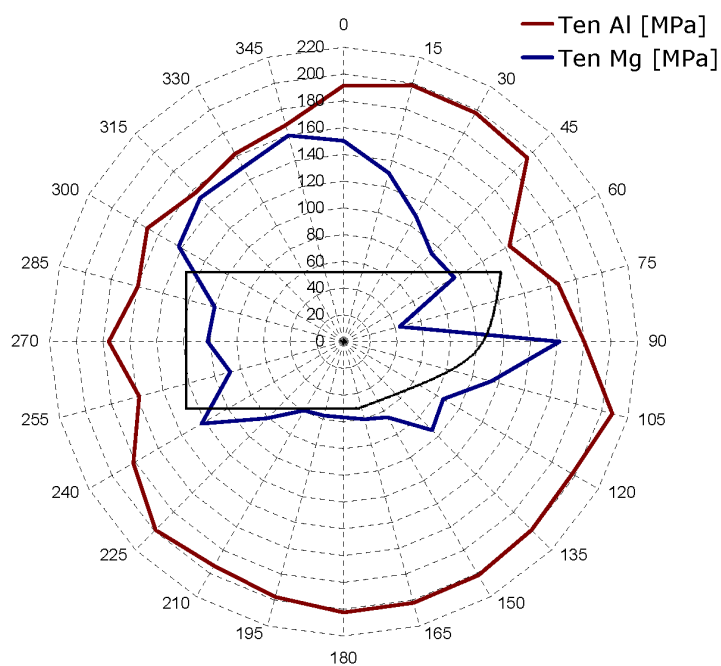


Figura 5.24: Distribuição polar da tensão do projectil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 10$ mm).

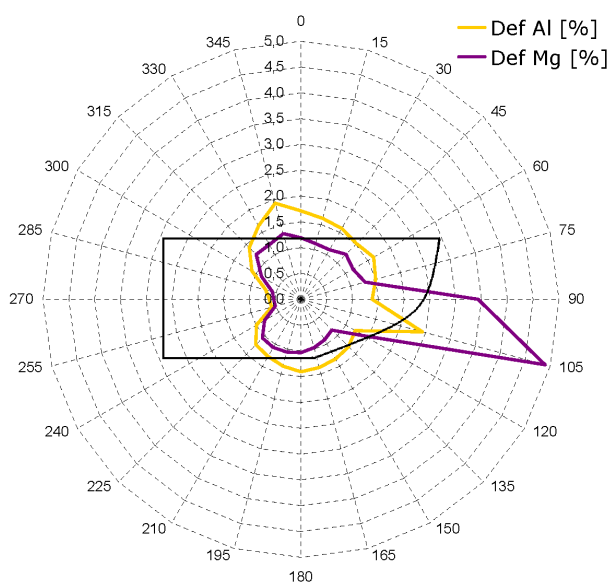


Figura 5.25: Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 10$ mm).

5.4 Alvo e projectil deformáveis — Modelo de dano

Nos parágrafos seguintes são apresentados os resultados, na forma de curvas de tensão e de deformação e dos campos de isovalores respectivos, para os alvos de Alumínio AA5083-H32 e Magnésio AZ31B-H24. Como foi referido anteriormente, consideram-se alvos com espessuras compreendidas entre 10 e 20 mm. O projectil de calibre 9 mm considera-se, em todas as análises desta secção, deformável e usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

No gráfico da figura 5.26 está representada a evolução quer da tensão equivalente quer da deformação plástica equivalente com a distância radial, desde o centro do alvo. Estes resultados dizem respeito aos alvos quer de Alumínio quer de Magnésio com 20 mm de espessura. Como se pode verificar pelos resultados apresentados na figura 5.26, a tensão máxima na face de impacto do alvo de Alumínio AA5083-H32 é $\sigma_{VM}^{max} = 221,8$ MPa, associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,288$. Por outro lado, para o alvo de Magnésio AZ31B-H34, o valor máximo de tensão é $\sigma_{VM}^{max} = 212,5$ MPa, associada a uma deformação máxima $\bar{\epsilon}^P = 0,367$. Assim, como se pode verificar por estes resultados, os níveis de tensão não variam muito com o material do alvo. Já os níveis de deformação plástica são significativamente diferentes, sendo a deformação no alvo de Magnésio cerca de 22% superior à deformação no alvo de Alumínio.

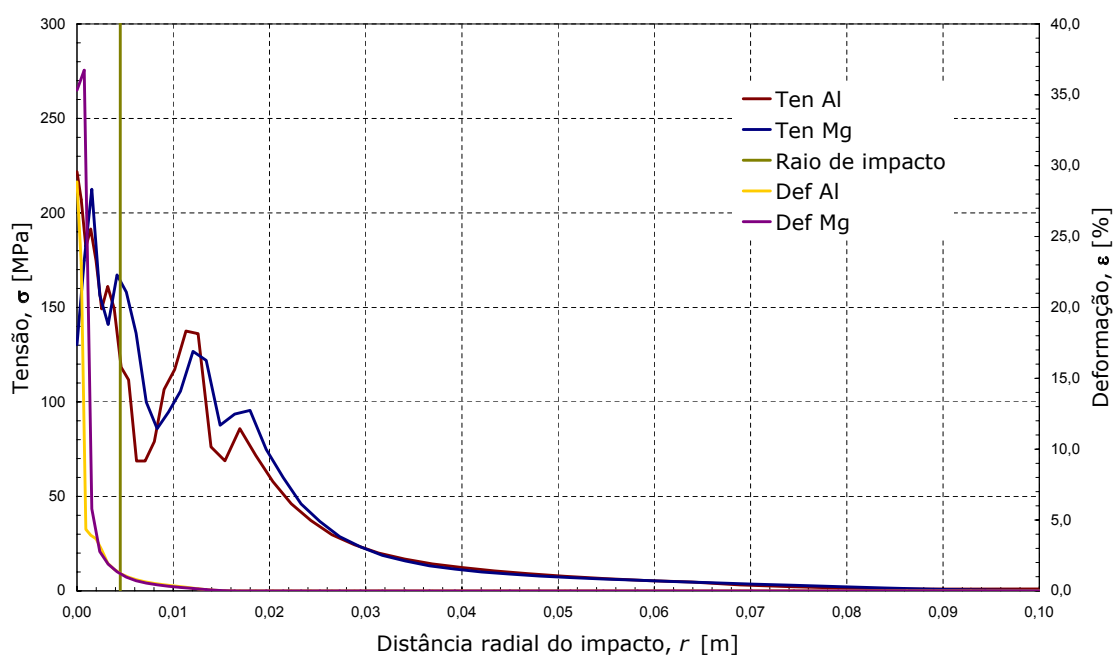


Figura 5.26: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 20$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

Considerando os resultados de tensão de von Mises que se mostram na figura 5.27, para o alvo de Alumínio AA5083-H32, pode verificar-se que se chegam a atingir tensões da ordem de 245,6 MPa. Nestes resultados é ainda possível verificar que a tensão na aresta de encastramento do alvo atinge valores próximos de 41,1 MPa. Porém, o campo de tensões torna-se uniforme antes de atingir a zona do encastramento. Com esta constatação pode concluir-se que a dimensão radial escolhida para o alvo é correcta.

Os resultados da figura 5.26 são recolhidos numa direcção a 45° com ambos os planos de simetria e na face de impacto. Na figura 5.27, em baixo, apresenta-se a distribuição de deformação

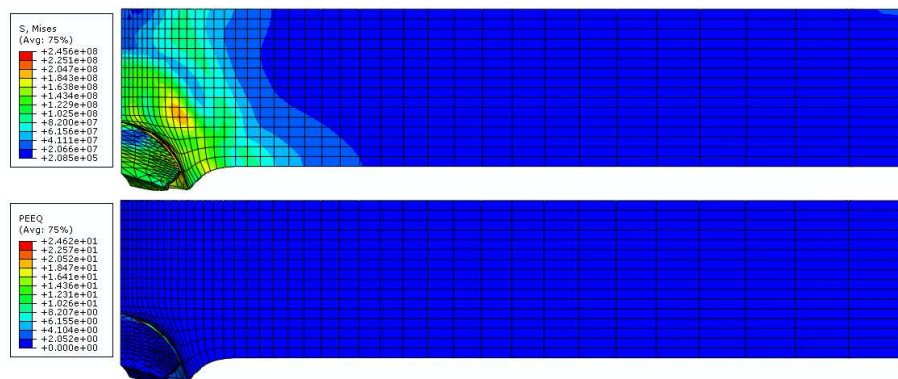


Figura 5.27: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 20$ mm e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

plástica equivalente no alvo de Alumínio AA5083-H32, que atinge valores da ordem de 24,6%

Na figura 5.28, referente às distribuições de tensões e de deformações no alvo de Magnésio AZ31B-H24 de espessura $d = 20$ mm, pode verificar-se que os valores máximos de tensão superam os 212,5 MPa com níveis de deformação plástica equivalente máxima de $\bar{\epsilon}^p = 0,367$. Porém, a distribuição de tensões é menos homogênea e chegam a atingir-se tensões de 35,6 MPa na aresta de encastramento do alvo, sem no entanto alterar significativamente a homogeneidade de distribuição de tensões no disco do alvo.

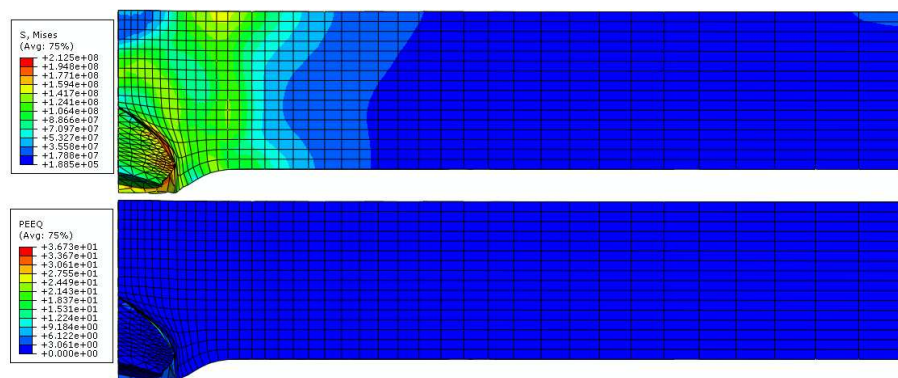


Figura 5.28: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 20$ mm e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

Comparando os resultados descritos nos parágrafos anteriores pode observar-se que no alvo de Alumínio AA5083-H32 se atingem níveis de tensão cerca de 13% mais elevados. No que diz respeito à deformação plástica equivalente, o alvo de Alumínio AA5083-H32 é o que exibe melhor comportamento, com deformações cerca de 33% inferiores.

Como foi referido anteriormente, para o projectil deformável, o material utilizado foi o Cobre. Fizaram-se ensaios para análise da tensão e deformação alcançados pelo projectil aquando do impacto com os alvos de diferentes espessuras, referenciando-se o ângulo para valores máximos de tensão e de deformação.

Os resultados referentes ao gráfico da figura 5.29 mostram que para um ângulo de 345° o projectil atinge uma tensão máxima $\sigma_{VM}^{max} = 203,5$ MPa aquando do embate no alvo de liga de Alumínio AA5083-H32, enquanto que a tensão mínima de $\sigma_{VM}^{min} = 29,6$ MPa é alcançada a cerca

de 90° .

Pode também verificar-se que, para o ângulo de 315° do projectil, este sofre uma tensão máxima $\sigma_{VM}^{max} = 185,2$ MPa e mínima $\sigma_{VM}^{min} = 7,8$ MPa, alcançada aos 255° no impacto com o alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24.

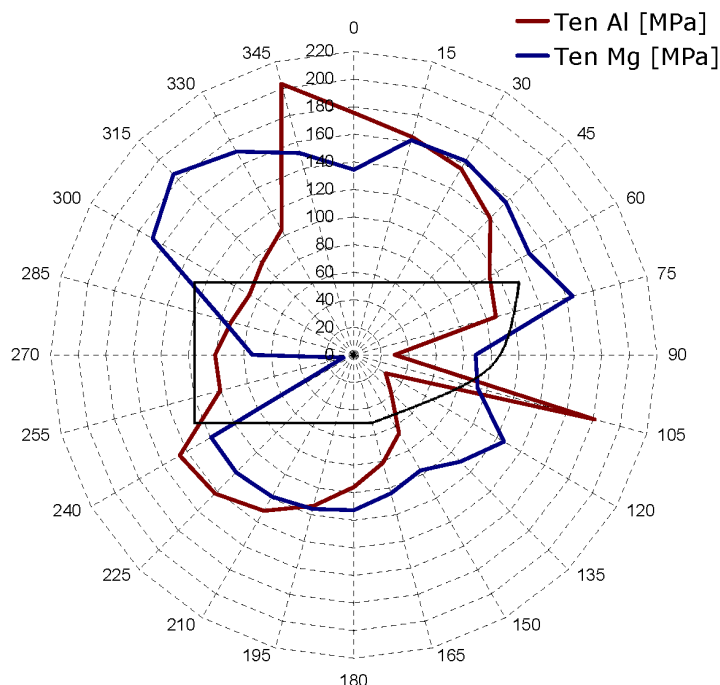


Figura 5.29: Distribuição polar da tensão do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 20$ mm).

Relativamente aos resultados do gráfico da figura 5.30 para o grau de deformação observa-se que $\bar{\epsilon}_{max}^p = 2,60\%$ aos 105° e $\bar{\epsilon}_{min}^p = 0,61\%$ para um ângulo de 255° , alcançadas pelo projectil no impacto com o alvo de Alumínio AA5083-H32. Para percentagens de deformação do projectil no impacto com o alvo de Magnésio AZ31B-H24, de acordo com os mesmos resultados (figura 5.30), observa-se que $\bar{\epsilon}_{max}^p = 2,81\%$ aos 105° e que a deformação mínima é $\bar{\epsilon}_{min}^p = 0,54\%$ para ângulo compreendidos entre 255 e 270° .

Relativamente aos gráficos para os dois tipos de material do alvo e comparando os resultados de impacto no projectil, verifica-se que este ao atingir o alvo de Alumínio (AA5083-H32) alcança valores de tensão máxima e mínima superiores comparativamente com a utilização do alvo de Magnésio (AZ31B-H24).

Analisando os valores de deformação para o mesmo ângulo, o projectil quando embate no alvo de Magnésio (AZ31B-H24) atinge valores de deformação máxima superiores, contrariamente a valores alcançados para uma deformação mínima que foram superiores aquando da utilização do alvo de Alumínio (AA5083-H32), para ângulos semelhantes.

Resumidamente, o projectil atinge tensões compreendidas entre 29,6 e 203,5 MPa, aquando do impacto com o alvo de Alumínio AA5083-H32 e deformações compreendidas entre 0,61 e 2,60%. No impacto com o alvo de Magnésio AZ31B-H24, o projectil atinge tensões compreendidas entre 7,8 e 185,2 MPa e deformações no intervalo de 0,54 a 2,81%.

Observando os resultados apresentados no gráfico da figura 5.31, correspondentes ao alvo com espessura $d = 15$ mm, verifica-se que o valor máximo de tensão no alvo de Alumínio AA5083-H32 é $\sigma_{VM}^{max} = 228,0$ MPa, associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^p = 0,294$. Por outro lado, para o alvo de Magnésio AZ31B-H34, o valor máximo de tensão é $\sigma_{VM}^{max} =$

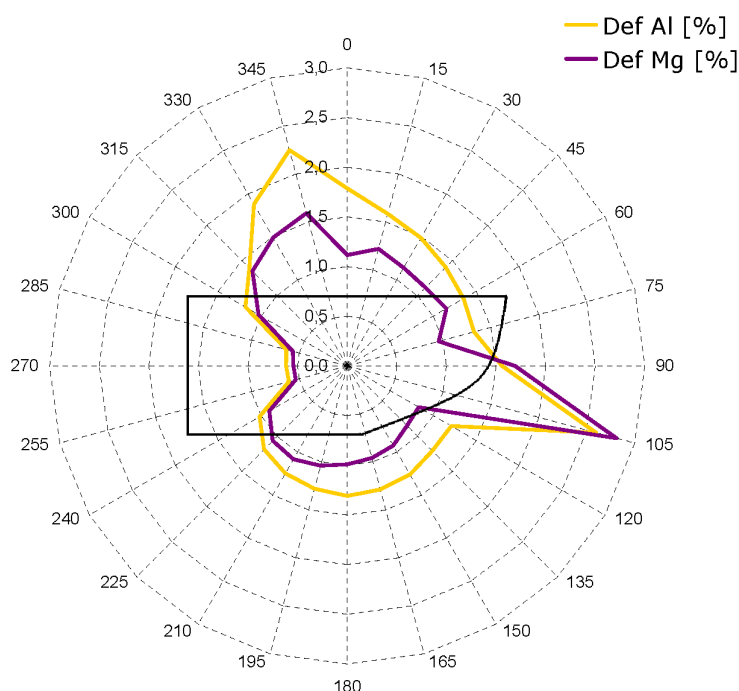


Figura 5.30: Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 20$ mm).

214,4 MPa, associada a uma deformação máxima $\bar{\epsilon}^p = 0,307$. Consequentemente, os níveis de tensão equivalente não variam muito com o material do alvo. Neste caso, também os níveis de deformação plástica são relativamente próximos, sendo a deformação no alvo de Magnésio cerca de 4% superior à deformação no alvo de Alumínio.

Relativamente aos resultados obtidos com o alvo de Alumínio, pode verificar-se que, de acordo com a distribuição de tensão equivalente que se apresenta na figura 5.32, a tensão máxima para este material é $\sigma_{VM}^{max} = 217,2$ MPa. Na aresta de encastramento verifica-se que, para o alvo de Alumínio AA5083-H32, se atinge uma tensão próxima de 40,9 MPa, sem alterar significativamente a homogeneidade de distribuição de tensões. O valor máximo de deformação plástica equivalente causada pelo impacto do projectil no alvo é $\bar{\epsilon}^p = 0,304$.

Analisando os resultados em termos de tensão de von Mises, que se mostram na figura 5.33, relativamente ao alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, pode verificar-se que a tensão máxima é $\sigma_{VM}^{max} = 220$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima $\sigma_{VM}^{max} = 112,9$ MPa. No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Magnésio, representada na mesma figura 5.33, observa-se que $\bar{\epsilon}^p = 0,307$.

Comparando os resultados obtidos, quer para o alvo de liga de Alumínio AA5083-H32 quer para o alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, pode afirmar-se que no alvo de Magnésio se atingem tensões máximas cerca de 1% mais elevadas do que para o alvo de Alumínio. O mesmo acontece para a deformação sendo que o alvo de Magnésio exibe uma maior capacidade de deformação do que o alvo de Alumínio, atingindo níveis de deformação plástica equivalente cerca de 3% superiores.

Nos resultados do gráfico da figura 5.34, verifica-se que o projectil de Cobre atinge uma tensão máxima $\sigma_{VM}^{max} = 185,2$ MPa para um ângulo de 0° , ao colidir o alvo de Alumínio, sendo o valor mínimo da tensão $\sigma_{VM}^{min} = 70,2$ MPa para 90° . Por outro lado, observando os resultados do gráfico da figura 5.34, referentes à tensão no projectil quando este colide com o alvo de Magnésio, verifica-se que $\sigma_{VM}^{max} = 203,2$ MPa para 90° e $\sigma_{VM}^{min} = 76,8$ MPa para 150° .

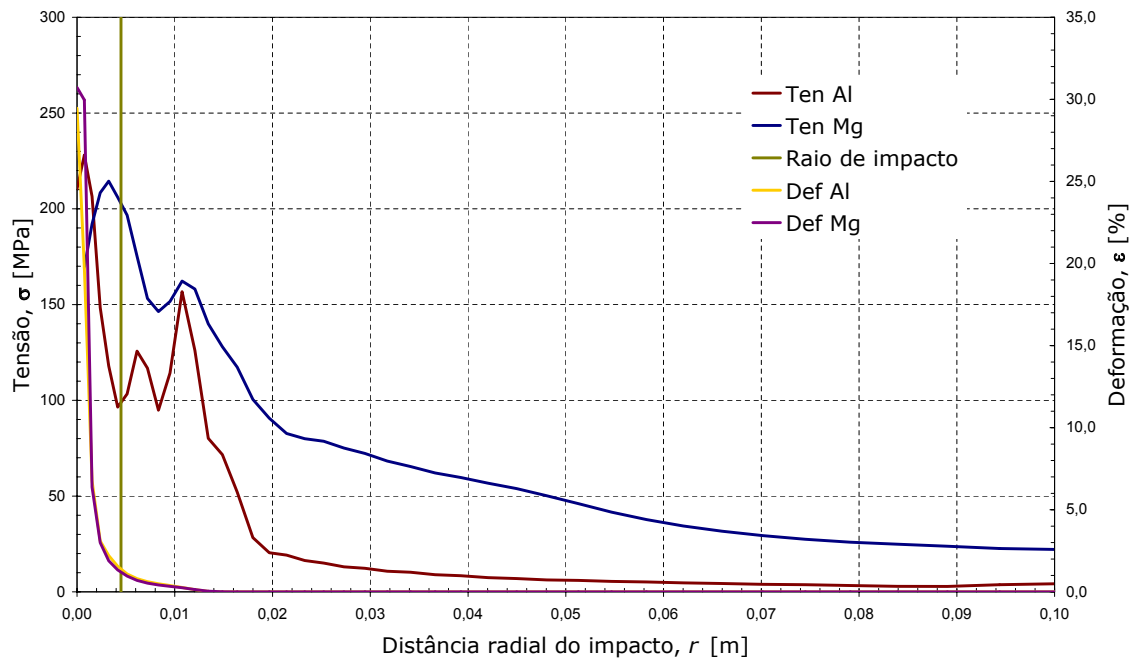


Figura 5.31: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^p$ para o alvo com espessura $d = 15$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

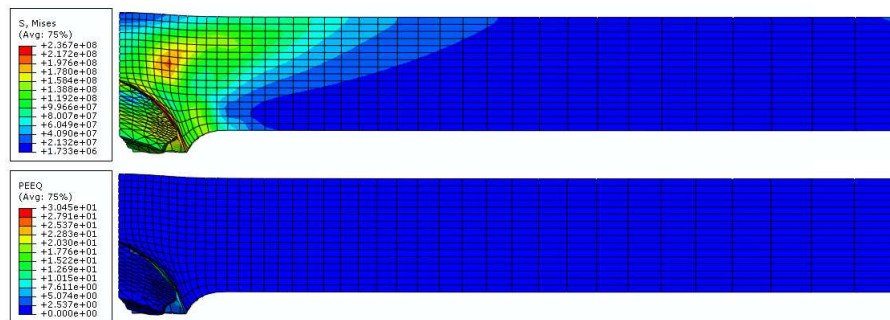


Figura 5.32: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 15$ mm e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

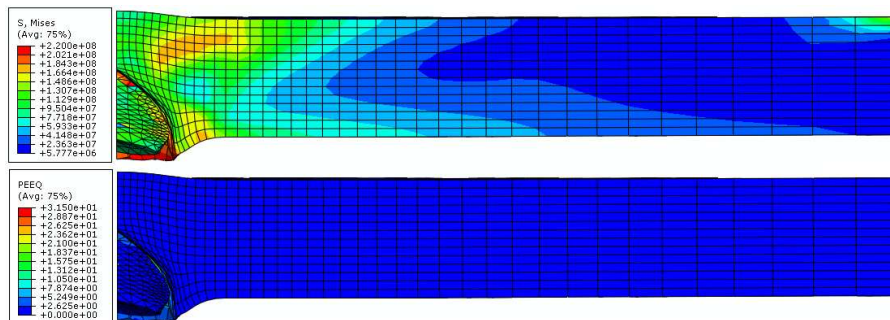


Figura 5.33: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 15$ mm e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

Examinando o gráfico da figura 5.35 verifica-se que para um ângulo de 105° no projectil este atinge a deformação máxima $\bar{\epsilon}_{\max}^p = 2,03\%$ e mínima $\bar{\epsilon}_{\min}^p = 0,57\%$ para 255° .

Analisando os resultados relativos ao nível de deformação do projectil no impacto com o alvo de Magnésio, no gráfico da figura 5.35, pode dizer-se que aos 105° , o projectil atinge uma deformação $\bar{\epsilon}_{\max}^p = 4,76\%$ e $\bar{\epsilon}_{\min}^p = 0,51\%$ para 255° .

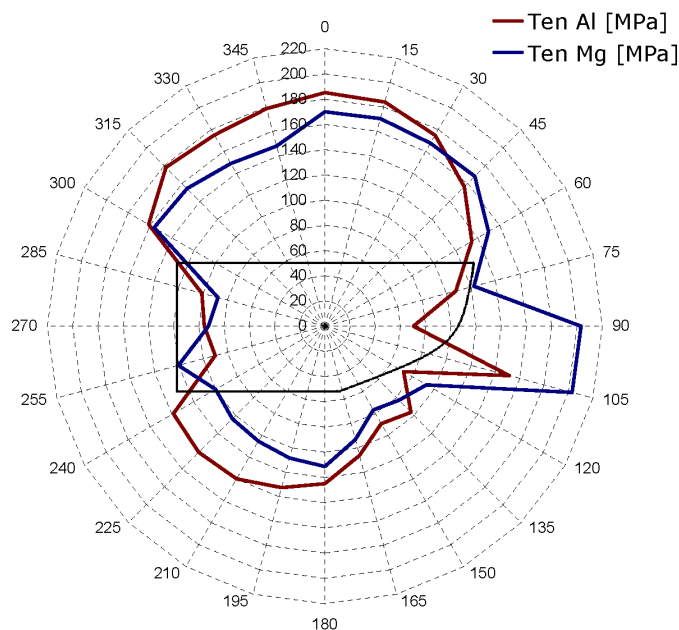


Figura 5.34: Distribuição polar da tensão do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 15$ mm).

Relativamente aos gráficos para os dois tipos de material do alvo e comparando os resultados obtidos pelo projectil no impacto, verifica-se que ao atingir o alvo de Alumínio AA5083-H32, o projectil alcança valores de tensão máxima e mínima superiores, comparativamente com a utilização do alvo de Magnésio AZ31B-H24.

Quanto ao nível de deformação, para o mesmo ângulo, o projectil aquando o embate no alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24 atinge valores de deformação máxima cerca de 57% superiores, contrariamente aos valores alcançados para uma deformação mínima que foram ligeiramente superiores aquando da utilização do alvo de liga de Alumínio AA5083-H32.

No gráfico da figura 5.36 mostra-se a evolução radial da tensão σ_{vM} e da deformação $\bar{\epsilon}^p$ para os alvos com espessura $d = 10$ mm (alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook). No caso do alvo de Alumínio, na face do alvo que recebe o impacto da ameaça, o valor para a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{\max} = 213,2$ MPa para uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^p = 0,283$. Já no caso do alvo de Magnésio a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{\max} = 200,1$ MPa associada a uma deformação plástica equivalente máxima $\bar{\epsilon}^p = 0,305$.

Analisando os resultados em termos de distribuição (isovalores) de tensão de von Mises, que se mostram na figura 5.9, relativamente ao alvo de liga de Alumínio, pode verificar-se que a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{\max} = 239,8$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima $\sigma_{vM}^{\max} \approx 62$ MPa. No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Alumínio observa-se que $\bar{\epsilon}^p = 0,325$.

Analisando os resultados em termos de distribuição (isovalores) de tensão de von Mises, que se mostram na figura 5.38, relativamente ao alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24, observa-se que a tensão máxima é $\sigma_{vM}^{\max} = 213,6$ MPa. Na aresta de encastramento, atinge-se uma tensão máxima

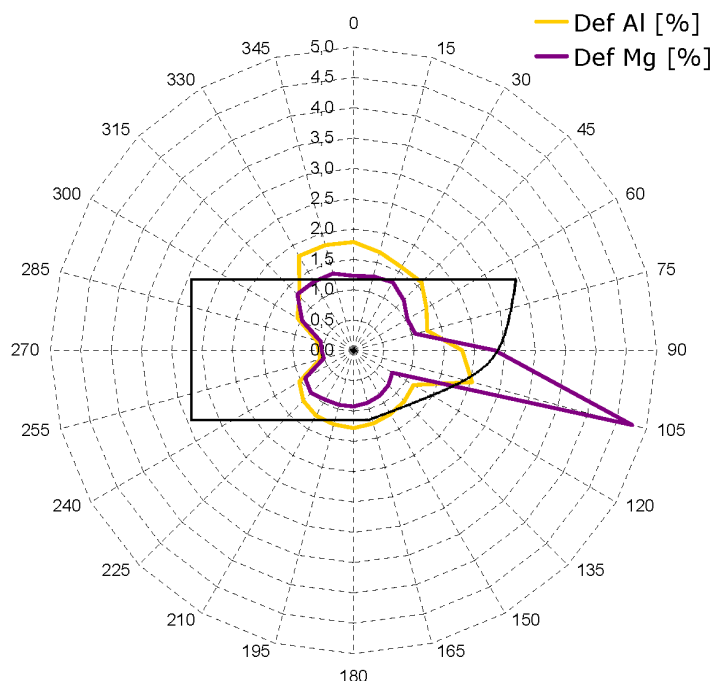


Figura 5.35: Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 15$ mm).

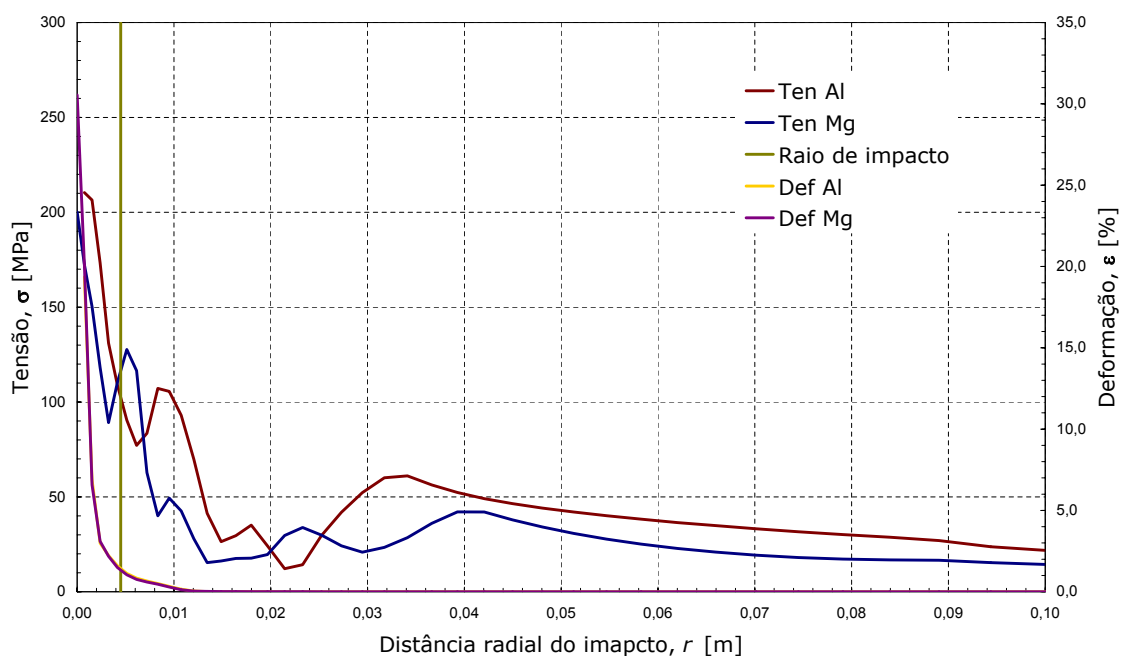


Figura 5.36: Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^p$ para o alvo com espessura $d = 10$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

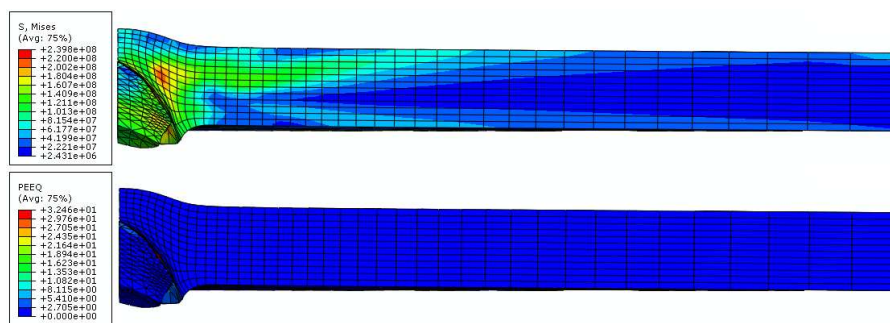


Figura 5.37: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 10$ mm e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.

$\sigma_{vM}^{\max} \approx 55$ MPa. No que diz respeito à distribuição de deformação plástica equivalente do alvo de Magnésio observa-se que $\bar{\epsilon}^p = 0,318$.

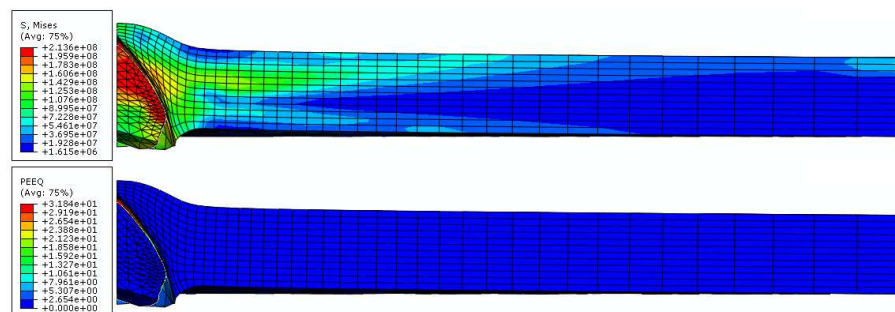


Figura 5.38: Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 10$ mm e projectil rígido.

Comparando os resultados obtidos, quer para o alvo de liga de Alumínio AA5083-H32 quer para o alvo de liga de Magnésio AZ31B-H24 com espessura $d = 10$ mm, pode afirmar-se, mais uma vez, que no alvo de Alumínio se atingem tensões máximas 11% mais elevadas do que para o alvo de Magnésio. A mesma tendência é evidente para a capacidade de deformação, cerca de 2% superior no alvo de liga de Alumínio.

Observam-se de seguida os resultados das figuras 5.39 e 5.40, que dizem respeito à tensão e deformação do projectil de Cobre ao colidir com os dois tipos de alvo (Alumínio e Magnésio) com espessura $d = 10$ mm.

Observando os resultados da figura 5.39 referentes à tensão e deformação do projectil no impacto com o alvo de Alumínio AA5083-H32, observa-se que $\sigma_{vM}^{\max} = 160,1$ MPa para um ângulo de 315° , atingida pelo projectil, e $\sigma_{vM}^{\min} = 52,1$ MPa alcançada aos 135° .

De acordo com os mesmos resultados de tensão (vd. figura 5.39), aquando da utilização do alvo de Magnésio como material do alvo, o projectil atinge aos 0° uma tensão equivalente máxima $\sigma_{vM}^{\max} = 209,9$ MPa, enquanto que $\sigma_{vM}^{\min} = 85,5$ MPa aos 255° .

Para o alvo de Alumínio AA5083-H32 observa-se, nos resultados do gráfico da figura 5.40, que $\bar{\epsilon}_{\max}^p = 3,87\%$ para um ângulo de 105° e $\bar{\epsilon}_{\min}^p = 0,53\%$ para 255° . Analisando os resultados do grau de deformação do projectil ao atingir o alvo de Magnésio AZ31B-H25, este alcança aos 255° $\bar{\epsilon}_{\min}^p = 0,48\%$ e $\bar{\epsilon}_{\max}^p = 1,34\%$ para 345° .

Analisando os resultados relativos ao projectil no impacto com os dois tipos de alvo, pode concluir-se que, utilizando o alvo de Magnésio o projectil atinge uma tensão máxima superior

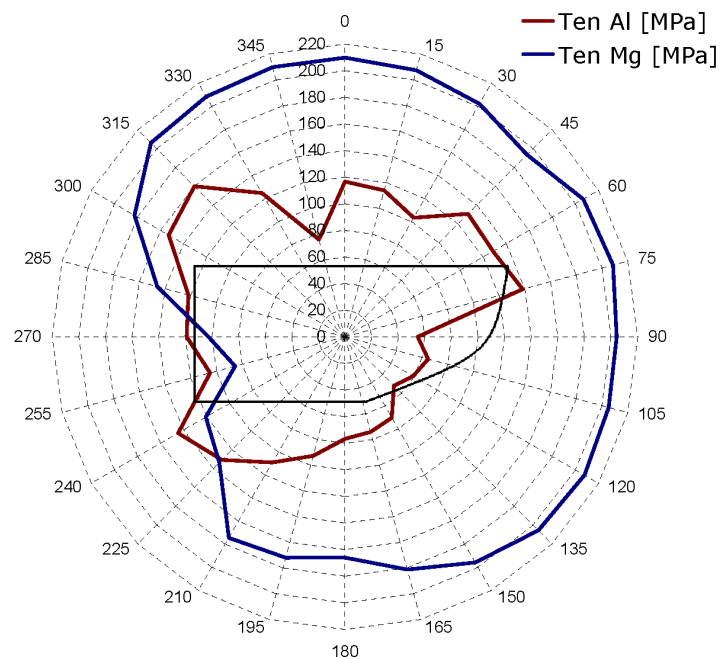


Figura 5.39: Distribuição polar da tensão do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 10$ mm).

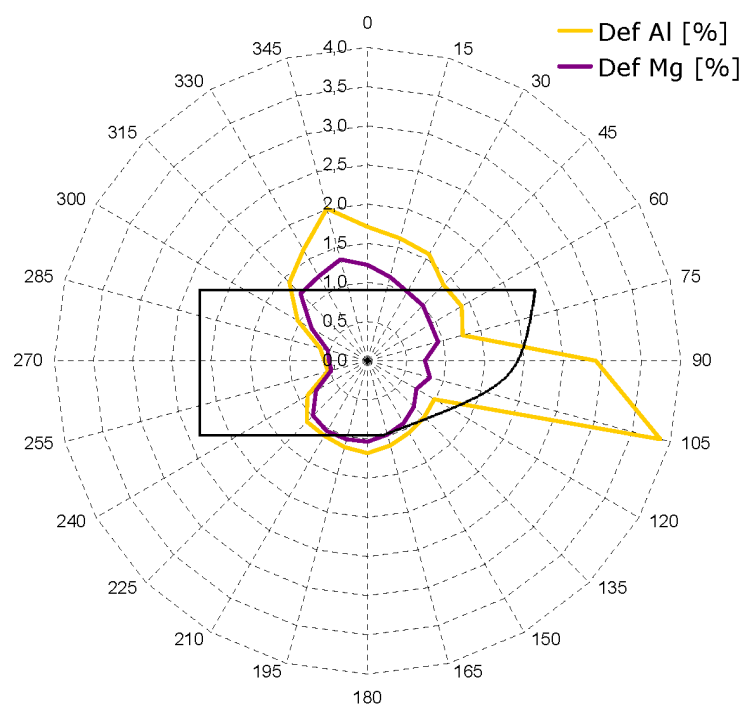


Figura 5.40: Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 10$ mm).

(209,9 MPa) num ângulo inferior, comparativamente com a utilização do alvo de Alumínio. Comparando os níveis de deformação no projectil, aquando do embate com o alvo de liga de Alumínio AA5083-H32, este atinge uma deformação máxima superior para um ângulo inferior. Para as deformações mínimas, atingidas no mesmo ângulo e utilizando os dois materiais, o projectil atinge valores superiores ao embater no alvo de Alumínio AA5083-H32.

Parte IV

Discussão e Conclusões

Capítulo 6

Discussão e Conclusões Gerais

Descrevem-se e discutem-se os resultados obtidos nos vários tipos de ensaios realizados, apresentando as distribuições de tensões e deformações atingidas em cada alvo.

6.1 Introdução

O objectivo proposto para este trabalho foi estudar a *performance* balística de algumas ligas metálicas leves. As ligas seleccionadas foram as ligas de Alumínio AA5083-H32 e de Magnésio AZ31B-H24. Para tal, foi implementado um modelo analítico para determinação da profundidade de penetração (DoP). Este parâmetro foi analisado para três grupos distintos de ensaios. Inicialmente foi considerado o projectil de 9 mm como um corpo indeformável e o alvo deformável. No segundo grupo de ensaios numéricos e analíticos considerou-se que quer o projectil quer o alvo são corpos deformáveis. No último grupo de testes, incorporou-se o modelo de dano de Johnson-Cook. Cada um destes três grupos era composto por seis simulações onde se fez variar o material do alvo — liga de Alumínio ou de Magnésio — e a espessura — entre 10 e 20 mm. Estes ensaios foram sujeitos, também, a simulação numérica para comparar os resultados de ambos os modelos, analítico e numérico. Consequentemente, de forma resumida, foi desenvolvido e implementado um modelo analítico de previsão de profundidade de penetração em alvos das ligas de Alumínio AA5083-H32 e de Magnésio AZ31B-H24 e procedeu-se à sua validação numérica. Foram então analisados os danos causados nos alvos e a influência da espessura destes, recorrendo a um projectil de ponta ogival com uma energia de impacto de 0,616 kJ.

6.2 Discussão

Os resultados dos gráficos das figuras 6.1 e 6.2 dizem respeito aos valores máximos de tensão e deformação atingidos quer pelos alvos de Alumínio quer de Magnésio, para todas as espessuras estudadas.

É possível verificar que, no gráfico da figura 6.1, referente às tensões para a espessura de 20 mm, o alvo de Alumínio absorveu maior energia (289 MPa) no segundo grupo de ensaios, ou seja, quando o projectil foi considerado deformável. No que diz respeito ao alvo de Magnésio com 20 mm de espessura, nota-se que este absorveu mais energia aquando o ensaio com o projectil rígido (258 MPa). Quanto aos alvos de espessura 15 mm, observa-se que o alvo de Alumínio atingiu os 286 MPa no segundo grupo de ensaios (projectil deformável) enquanto o alvo de Magnésio atingiu

um máximo de 280 MPa no ensaio considerando o projectil como um corpo rígido. Por fim, nos ensaios sobre alvos de espessura $d = 10$ mm, a liga de Alumínio de AA5083-H32 alcançou uma tensão máxima de 270 MPa ao ser atingido pelo projectil rígido, ao mesmo tempo que o alvo de Magnésio atinge uma tensão máxima de 224MPa.

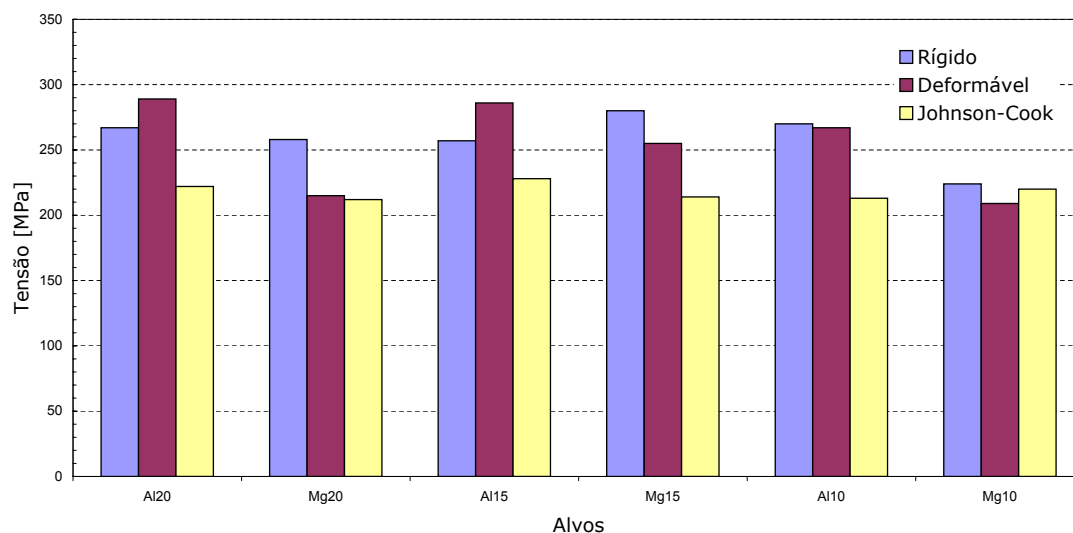


Figura 6.1: Valores máximos de tensão atingidos nos vários ensaios realizados.

No que diz respeito aos resultados do gráfico da figura 6.2, referente às deformações para a espessura de 20 mm, o alvo de liga Alumínio AA5083-H32 atingiu uma deformação máxima de 0,44 no impacto com o projectil rígido, isto é, no primeiro grupo de ensaios. No que diz respeito ao alvo de Magnésio com 20 mm de espessura, observa-se que este teve maior deformação (0,37) no ensaio usando o modelo de dano de Johnson-Cook. Quanto aos alvos de espessura 15 mm, verifica-se que o alvo de Alumínio exibe uma deformação máxima de 0,29, também no terceiro grupo de ensaios, bem como para a liga de Magnésio. Por fim, nos ensaios com espessura $d = 10$ mm, a liga de Alumínio de AA5083-H32 alcançou um máximo de deformação de 0,37 ao ser atingido pelo projectil rígido, enquanto o alvo de Magnésio deformou 0,31 no ensaio usando o modelo de Johnson-Cook.

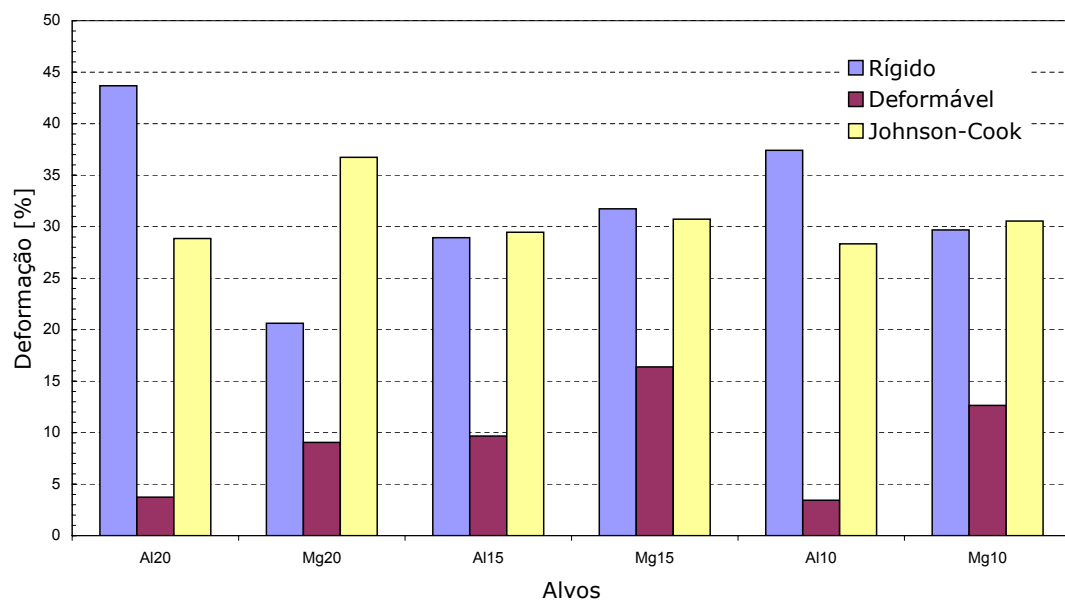


Figura 6.2: Valores máximos de deformações atingidos nos vários ensaios realizados.

Capítulo 7

Comparação do Modelo Analítico e Numérico

Analisa-se, de forma comparativa, os modelos analítico e numérico, através da profundidade de penetração (DoP).

7.1 Comparação entre os Modelos Analítico e Numérico

Na tabela 7.1 encontram-se os resultados analíticos para a espessura das zonas confinada e não-confinada em cada alvo (Alumínio e Magnésio para as diferentes espessuras) obtidos nos ensaios. Estes valores quantificam, em percentagem, a fracção de espessura das regiões I e II. Observa-se que as fracções α_1 e α_2 se mantêm inalteradas para os diferentes tipos de ensaio, com o projectil rígido, deformável ou até mesmo usando o modelo de dano de Johnson-Cook, assim como para as diferentes espessuras. Isto é, para o alvo de Alumínio, para as espessuras de 20, 15 e 10 mm a fracção de espessura de α_1 é de 69% para os diferentes ensaios, enquanto que para α_2 o valor é de 31%. Analisando os resultados obtidos para os diferentes ensaios a diferentes espessuras, para o alvo de Magnésio, α_1 obteve 65% dando origem a que α_2 fosse de 35%. Este resultado verifica-se visto que, como se pôde verificar na Secção 2.2, α_1 e α_2 dependem da velocidade de impacto (v_0) e da velocidade do projectil na interface entre as regiões I e II (v_1). Esta última, por sua vez, depende da densidade do material do alvo (ρ), da velocidade elástica longitudinal de onda (c_e), e da tensão limite de elasticidade do material (σ_y). Assim, conclui-se que, a espessura do alvo até à profundidade em que deixa de se fazer sentir a cavidade provocada pelo projectil (α_1) e a restante espessura (α_2) dependem apenas do material e não da espessura do alvo, ou do tipo de ensaio.

O mesmo se verifica para os valores do mérito balístico (ϕ), sendo este de 17,14 para o alvo usando a liga de Alumínio AA5083-H32 e de 21,47 para o alvo constituído pela liga de Magnésio AZ31B-H24.

No que diz respeito aos resultados numéricos da profundidade de penetração (DoP) do projectil no alvo, na tabela 7.2 pode verificar-se que, à excepção dos alvos de 10 e 15 mm de Magnésio com projectil rígido, à medida que a espessura do alvo diminui, a profundidade de penetração aumenta, como seria de esperar. É também de notar que o grupo de ensaios que exhibe menor profundidade de penetração é quando se considera o projectil deformável, seguido pelo ensaio usando o modelo de dano de Johnson-Cook e o primeiro grupo de ensaios, em que os alvos são atingidos pelo projectil rígido, foi o que obteve maior DoP.

Concluindo, verifica-se que o modelo analítico não valida o modelo numérico, visto que apenas

Tabela 7.1: Resultados analíticos da percentagem de profundidade de penetração (DoP) para a zona confinada (α_1) e não-confinada (α_2) e mérito balístico de cada alvo para os vários ensaios.

Ref ^a	Projétil rígido		Projétil deformável		Johnson Cook		Mérito balístico ϕ
	α_1	α_2	α_1	α_2	α_1	α_2	
A20	69	31	69	31	69	31	17,14
M20	65	35	65	35	65	35	21,47
A15	69	31	69	31	69	31	17,14
M15	65	35	65	35	65	35	21,47
A10	69	31	69	31	69	31	17,14
M10	65	35	65	35	65	35	21,47

um é influenciado pela espessura do alvo — o modelo numérico — enquanto que o modelo analítico apenas depende das propriedades do material do alvo.

Como também seria de esperar, visto estar inserido no modelo analítico, os módulos plástico e volumétrico (equações 2.33 e 2.34), dependentes da equação de THOR (equação 2.31), também dependem apenas do material do alvo. Para a resolução da equação 2.31 os parâmetros usados encontram-se na tabela 7.3.

Tabela 7.2: Resultados numéricos da percentagem de profundidade de penetração (DoP) dos diferentes alvos e ensaios.

Ref ^a	Projétil rígido	Projétil deformável	Johnson Cook
A20	50	21	29
M20	50	31	40
A15	33	33	43
M15	65	40	56
A10	133	60	86
M10	132	90	132

Tabela 7.3: Parâmetros necessários para a equação de THOR.

Material	c	α	β	γ	λ	θ
Alumínio	7,047	1,029	-1,072	1,251	-0,139	90
Magnésio	6,904	1,092	-1,170	1,050	-0,087	90

Lista de Figuras

1.1	Esquema da classificação das armas.	6
1.2	A pistola semi-automática <i>Walther</i> P99 em corte.	8
1.3	Representação esquemática dos constituintes de uma munição de 9 mm de ponta oca: 1 – projétil, 2 – carga 3 – invólucro e 4 – fulminante.	8
1.4	Alguns tipos de projéteis de ponta ogival.	9
1.5	Exemplo de projétil semi-camisado de ponta oca.	10
1.6	Representação esquemática do procedimento de medição do calibre de um projétil.	10
1.7	(a) Alguns exemplos de invólucros de projéteis de uso <i>comum</i> e (b) diferentes tipos de invólucros: 1 – cilíndrico, 2 – cónico e 3 – garrafa.	13
1.8	(a) Representação de alguns fulminantes de uso <i>comum</i> e (b) tipos de fulminantes: 1 – <i>boxer</i> e 2 – <i>berdan</i>	13
1.9	Alguns exemplos de munições de calibre 9 mm Luger (9 mm Parabellum).	14
2.1	Representação esquemática da zona confinada (região I) e não-confinada (região II).	22
2.2	Representação esquemática da região plástica e elástica no alvo após o impacto.	23
2.3	Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Alumínio com projétil rígido.	28
2.4	Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Magnésio com projétil rígido.	29
2.5	Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Alumínio com projétil deformável.	30
2.6	Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Magnésio com projétil deformável.	30
2.7	Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Alumínio com projétil deformável recorrendo ao modelo de dano de Johnson-Cook.	31
2.8	Resultados analíticos para as várias componentes de energia absorvida pelo alvo de Magnésio com projétil deformável recorrendo ao modelo de dano de Johnson-Cook.	32
4.1	Representação genérica do tipo de malha de elementos finitos utilizada nos ensaios numéricos.	43
5.1	Representação esquemática do ensaio com alvo e projétil completo (em cima). Representação esquemática de um quarto do alvo para análise numérica (em baixo).	48
5.2	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 20$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projétil rígido.	49
5.3	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 20$ mm e projétil rígido.	49
5.4	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 20$ mm e projétil rígido.	50

5.5	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 15$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projétil rígido.	51
5.6	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 15$ mm e projétil rígido.	51
5.7	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 15$ mm e projétil rígido.	52
5.8	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 10$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projétil rígido.	53
5.9	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 10$ mm e projétil rígido.	53
5.10	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 10$ mm e projétil rígido.	53
5.11	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 20$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projétil deformável.	54
5.12	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 20$ mm e projétil deformável.	55
5.13	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 20$ mm e projétil deformável.	55
5.14	Distribuição polar da tensão do projétil deformável de Cobre ao atingir o alvo ($d = 20$ mm).	56
5.15	Distribuição polar da deformação do projétil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 20$ mm).	57
5.16	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 15$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projétil deformável.	57
5.17	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 15$ mm e projétil rígido.	58
5.18	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 15$ mm e projétil deformável.	58
5.19	Distribuição polar da tensão do projétil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 15$ mm).	59
5.20	Distribuição polar da deformação do projétil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 15$ mm).	59
5.21	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 10$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projétil deformável.	60
5.22	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 10$ mm e projétil deformável.	61
5.23	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 10$ mm e projétil deformável.	61
5.24	Distribuição polar da tensão do projétil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 10$ mm).	62
5.25	Distribuição polar da deformação do projétil de Cobre ao atingir o alvo ($d = 10$ mm).	62
5.26	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 20$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projétil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.	63
5.27	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 20$ mm e projétil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.	64
5.28	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 20$ mm e projétil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.	64
5.29	Distribuição polar da tensão do projétil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 20$ mm).	65

5.30	Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 20$ mm).	66
5.31	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 15$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.	67
5.32	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 15$ mm e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.	67
5.33	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 15$ mm e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.	67
5.34	Distribuição polar da tensão do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 15$ mm).	68
5.35	Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 15$ mm).	69
5.36	Evolução radial da tensão σ_{VM} e da deformação $\bar{\epsilon}^P$ para o alvo com espessura $d = 10$ mm. Alvos de Alumínio e de Magnésio e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.	69
5.37	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Alumínio com espessura $d = 10$ mm e projectil deformável usando o modelo de dano de Johnson-Cook.	70
5.38	Isovalores de tensão (em cima) e de deformação (em baixo) no plano de simetria do alvo. Alvo de Magnésio com espessura $d = 10$ mm e projectil rígido.	70
5.39	Distribuição polar da tensão do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 10$ mm).	71
5.40	Distribuição polar da deformação do projectil de Cobre (com modelo de dano) ao atingir o alvo ($d = 10$ mm).	71
6.1	Valores máximos de tensão atingidos nos vários ensaios realizados.	76
6.2	Valores máximos de deformações atingidos nos vários ensaios realizados.	77

Lista de Tabelas

2.1	Propriedades físicas e mecânicas da ligas de Alumínio AA5083-H32 e de Magnésio AZ31B-H24.	27
2.2	Dados de cálculo para os alvos de Alumínio e Magnésio considerando o projétil rígido.	28
2.3	Dados de cálculo analítico para os alvos de Alumínio e Magnésio considerando o projétil deformável.	29
2.4	Dados para o cálculo analítico para os alvos de Alumínio e Magnésio considerando o modelo de dano de Johnson-Cook.	31
4.1	Resumo dos ensaios de simulação numérica realizados.	42
4.2	Caracterização das malhas de elementos finitos.	44
4.3	Composição química das ligas de Alumínio AA5083-H32 e Magnésio AZ31B-H24.	44
4.4	Propriedades físicas e mecânicas do Cobre utilizado para caracterizar o projétil.	45
7.1	Resultados analíticos da percentagem de profundidade de penetração (DoP) para a zona confinada (α_1) e não-confinada (α_2) e mérito balístico de cada alvo para os vários ensaios.	80
7.2	Resultados numéricos da percentagem de profundidade de penetração (DoP) dos diferentes alvos e ensaios.	80
7.3	Parâmetros necessários para a equação de THOR.	80

Bibliografia

- [1] W. A. Allen and J.W. Rogers. Penetration of a rod into a semi-infinite target. *Journal of the Franklin Institute*, 272(4):275–284, October 1961.
- [2] J. Awerbuch and S.R. Bodner. Analysis of the mechanics of perforation of projectiles in metallic plates. *International Journal of Solids and Structures*, 10(6):671–684, June 1974.
- [3] M.E. Backman and W. Goldsmith. The mechanics of penetration of projectiles into targets. *International Journal of Engineering Science*, 16(1):1–99, 1978.
- [4] R. F. Bishop, R. Hill, and N.F. Mott. The theory of indentation and hardness tests. *Proc. Phys. Soc.*, 57:147–155, 1945.
- [5] R.S.J. Corran, P.J. Shadbolt, and C. Ruiz. Impact loading of plates – an experimental investigation. *International Journal of Impact Engineering*, 1(1):3–22, 1983.
- [6] R.J. Eichelberger. Experimental test of the theory of penetration by metallic jets. *Journal of Applied Physics*, 27:63, 1956.
- [7] J. Fish and T. Belytschko. *A first Course in Finite Elements*. 2007.
- [8] M.J. Forrestal, Z. Rosenberg, V.K. Luk, and S.J. Bless. Perforation of aluminium plates with conical-nosed rods. *Journal of Applied Mechanics, Transactions ASME*, 54:230–232, 1987.
- [9] D. James. A unified theory of penetration. *International Journal of Impact Engineering*, 5(1-4):239–248, 1987.
- [10] W. Johnson. *Impact strength of materials*. Edward Arnold, 1972.
- [11] G.H. Jonas and J.A. Zukas. Mechanics of penetration: Analysis and experiment. *International Journal of Engineering Science*, 16(11):879–903, 1978.
- [12] B.L. Landkof and W. Goldsmith. Petalling of thin, metallic plates during penetration by cylindro-conical projectiles. *International Journal of Solids and Structures*, 21(3):245–266, 1985.
- [13] D.B. Longcope and M.J. Forrestal. Penetration of target described by a mohr-coulomb failure criterion with a tension cutoff. *Journal of Applied Mechanics*, 50:327–333, 1983.
- [14] J. Radin and W. Goldsmith. Normal projectile penetration and perforation of layered targets. *International Journal of Impact Engineering*, 7(2):229–259, 1988.
- [15] M. Ravid and S.R. Bodner. Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles. *International Journal of Engineering Science*, 21(6):577–591, 1983.

-
- [16] P. Sinha, I.P. Singh, and C.H. Ma. Effects of shock loading on the young's modulus of alloy 2024 al. *Journal of Applied Physics*, 48:167, 1977.
- [17] B. Srivathsa and N. N. Ramakrishnan. On the ballistic performance of meralllic materials. *Bulletin of Materials Science*, 20:111–123, 1997.
- [18] D. Tabor. A simple theory of static and dynamic hardness. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 192:247–274, 1948.
- [19] A. Tate. A possible explanation for the hydrodynamic transition in high speed impact. *International Journal of Mechanical Sciences*, 19(2):121–123, February 1977.
- [20] G. Taylor. The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress. i. theoretical considerations. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, 194:289–299, 1948.
- [21] W. T. Thompson. An approximate theory of armor penetration. *Journal of Applied Physics*, 26:80–82, 1955.
- [22] Project THOR. *The resistance of various metallic materials to perforation by steel fragments - Empirical relationships for fragment residual velocity and weight*. Ballistic Research Laboratory, Aberdeen proving ground, USA, 1993.
- [23] R.L. Woodward. The penetration of metal targets which fail by adiabatic shear plugging. *International Journal of Mechanical Sciences*, 20(9):599–607, 1978.